

Titre: Modèle d'évolution sédimentaire d'un segment de rivière
Title:

Auteur: Amphone Vongvixay
Author:

Date: 2001

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Vongvixay, A. (2001). Modèle d'évolution sédimentaire d'un segment de rivière
Citation: [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/6972/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6972/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**MODÈLE D'ÉVOLUTION
SÉDIMENTAIRE D'UN SEGMENT DE RIVIÈRE**

**AMPHONE VONGVIXAY
DÉPARTEMENT DES GÉNIES
CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
MARS 2001**

© Amphone Vongvixay, 2001



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-65565-2

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

**MODÈLE D'ÉVOLUTION
SÉDIMENTAIRE D'UN SEGMENT DE RIVIÈRE**

présenté par: VONGVIXAY Amphone

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. KAHAWITA René, Ph.D., président

M. MARCHE Claude, D.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. LAVALLÉE Daniel, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

J'aimerais prendre quelques instants pour remercier les nombreuses personnes qui ont contribué à ce projet. Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Monsieur Claude Marche, professeur titulaire au département de Génie Civil de l'École Polytechnique de Montréal, pour sa générosité, sa compétence, sa patience, ses encouragements dans les moments difficiles et pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'offrant l'occasion de réaliser ce mémoire.

Je voudrais remercier également Monsieur Daniel Lavallée, ingénieur de l'unité de conception des aménagements de production de l'Hydro-Québec, pour son dévouement et pour les suggestions intéressantes et très utiles qu'il m'a données à chaque étape importante de ma recherche.

J'ai une vive reconnaissance envers Monsieur André Ducharme pour son aide indispensable lors des travaux de laboratoires.

Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur Ugo-Mercier Gouin, Madame Jeanne Gallagher, Madame Diane Dubois, conseillère pédagogique du Programme Canadien de Bourse de la Francophonie de l'ACDI, pour leur suivi et leur guide dévoués tout au long de mes études. Pour son support financier, je tiens à remercier le Programme Canadien de Bourses de la Francophonie de l'ACDI. Sans son aide, la réalisation de cet ouvrage n'aurait jamais été possible.

Finalement, je tiens à remercier beaucoup mes parents, mon mari et mes enfants dont les encouragements provenant régulièrement de l'autre côté de la terre ont renforcé ma persévérance. Particulièrement, je remercie mon mari pour sa compréhension : grâce à lui, la "concurrence" entre les travaux de recherche et les tâches familiales n'est jamais devenue une "problématique de recherche".

RÉSUMÉ

L'étude du débit solide des cours d'eau naturels constitue sans doute la branche la plus difficile de domaine d'hydraulique fluviale. Le sujet est vaste et le présent projet de mémoire traite d'un aspect limité au développement d'un modèle d'évolution sédimentaire d'un segment de rivière. Le but est d'établir les évolutions sédimentaires de ce segment de rivière en calculant les évolutions des fonds (érosions, dépôts), leur rythme, leur cycle annuel, leurs évolutions accidentelles (crue exceptionnelle) et la charge sédimentaire transmise en aval. Ce calcul se fait pour les débits typiques annuels et en fonction des charges sédimentaires parvenant aux sites, l'étude par l'amont et le bassin.

Ce mémoire comprend plusieurs parties. Tout d'abord, nous avons une revue de littérature concernant les études de transport des sédiments directement utiles à une étude de l'évolution sédimentaire d'un segment donné de rivière. Puis, nous avons calculé les débits et les niveaux moyens et maximaux annuels du segment étudié pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans en utilisant la loi de la distribution log-normale. Selon les résultats de ces calculs, les débits maximumaux annuels en amont du segment étudié pour les récurrences mentionnées ci-dessus sont respectivement de 2039 m³/s, 3150 m³/s, 3618 m³/s et 4526 m³/s. Les niveaux maximumaux annuels en aval correspondant aux débits maximaux mentionnés sont respectivement alors de 11.6 m, 14 m, 14.8 m et 16.4 m. Le réglage des coefficients de rugosité de Manning dans le lit mineur et dans la plaine d'inondation du segment étudié a été effectué. Nous avons trouvé que les coefficients de Manning étaient respectivement de 0.026 et 0.028 pour le lit mineur et dans la plaine d'inondation.

Ensuite, nous avons développé une équation pour calculer la concentration (en mg/l) en sédiments en fonction du débit liquide à Tha Lat (en amont) et à Tha Ngone (au milieu du segment étudié). Les débits solides en tonnes par jour à Tha Lat et à Tha Ngone ont

été estimés par la méthode Flow-Duration, Rating-Curve (FDRC). Pour ces deux endroits la relation entre le débit solide en (tonnes/jour) et le débit liquide en (m^3/s) est la suivante : $Q_s = 0.00994 Q_l^2$ à Tha Lat et $Q_s = 0.007102 Q_l^2$ à Tha Ngone. Les débits atteignent leur valeur maximale au mois d'août.

Enfin, nous avons analysé l'évolution du lit du segment Tha Lat – Pak Ngum de la Nam ngum en utilisant le modèle hydraulique GSTARS 2.0. La simulation sédimentaire dans ce segment a été faite pour une durée de 35 jours et pour les trois cas d'étude suivants: la situation existante, l'ajout d'un barrage en amont du segment choisi et la déforestation dans le bassin de la Nam Ngum. En utilisant l'équation de transport solide de Yang (1979), la simulation de l'évolution sédimentaire a été faite pour des débits liquides de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans. Selon les résultats obtenus, nous avons trouvé que dans le processus de l'évolution du lit du segment étudié il y a deux bassins de décantation formés, l'un en amont (entre les sections 6 - 10) et l'autre au milieu (sections 24 et 25). Particulièrement, pour le cas d'ajout d'un barrage en amont du segment étudié et pour des débits liquides de récurrence de 10, 20 et 100 ans, le bassin de décantation au milieu est disparu et un nouveau bassin de décantation s'est formé en aval (sections 41 et 42). Comme autre remarque nous avons constaté que pour le cas d'ajout d'un barrage en amont du segment étudié, le lit de ce segment a tendance à se creuser partout. Au contraire, pour le cas où s'il devait y avoir une forte déforestation dans le bassin de la Nam Ngum, le lit du segment choisi a tendance cette fois à se remplir.

Pour les trois cas d'étude et pour les récurrences mentionnées ci-dessus, la quantité des sédiments entrant et quittant le segment étudié après 35 jours de simulation de l'évolution sédimentaire est étudiée. La quantité accumulée de sédiments qui quitte le tronçon étudié après 35 jours de simulation pour les trois cas d'étude a été comparée et confirme qu'elle croît dans le cas de la déforestation sur le bassin de la Nam Ngum.

ABSTRACT

The study of the bed load of the natural rivers undoubtedly constitutes the most difficult branch of field of river hydraulics. The subject is vast and this project of memory treats of an aspect limited to the development of a sedimentary model of evolution of a segment of river. The goal is to establish the sedimentary evolutions of this segment of river by calculating the evolutions of the bed (erosions, deposits), their rate/rhythm, their annual cycle, their accidental evolutions (exceptional rising) and the downstream transmitted sedimentary load. This calculation is done for the typical annual flow rate and according to the sedimentary loads arriving at the sites, the study by the upstream and the basin.

This memory includes several parts. First of all, we joined together reviews literatures concerning the studies of transport of the sediments directly useful to a study of the sedimentary evolution of a given segment of river. Then, we calculated the mean and maximum annual flows rates and the levels of the studied segment for the recurrences of 2, 10, 20 and 100 years by using the law of the log-normal distribution. According to results' of these calculations, the maximum annual flow rate at upstream of the studied segment for the recurrences mentioned above are 2039 m³/s, 3150 m³/s, 3618 m³/s and 4526 m³/s, respectively. The annual maximum levels at downstream corresponding to the maximum flows mentioned are 11.6 m, 14 m, 14.8 m and 16.4m, respectively. The adjustment of the coefficients of roughness of Manning in the minor bed and the plain of flood of the studied segment was carried out. We found that the coefficients of Manning were 0.026 and 0.028, respectively, for the minor bed and in the plain of flood.

Then, we developed an equation to calculate the concentration (in mg/l) in sediments according to the liquid flow at Tha Lat (upstream) and at Tha Ngone (in the medium of the studied segment). The bed loads in tons per day at Tha Lat and at Tha Ngone were

estimated by the method Flow-Duration, Rating-Curve (FDRC). For these two places the relation between the bed load in (tons/day) and the liquid flow in (m³/s) is as follows: $Q_s = 0.00994 Q_l^2$ at Tha Lat and $Q_s = 0.007102 Q_l^2$ at Tha Ngone. The flows reach their maximum value in August.

Finally, we analyzed the evolution of the bed of the segment Tha Lat - Pak Ngum of Nam Ngum by using hydraulic model GSTARS 2.0. Sedimentary simulation in this segment was made for a duration of 35 days and the three following cases of study: the existing situation, the addition of a dam at upstream of the selected segment and deforestation in the basin of Nam Ngum. By using the solid transport equation of Yang (1979), the simulation of the sedimentary evolution was made for liquid flows of recurrence of 2, 10, 20 and 100 years. According to results' obtained, we found that in the process of the evolution of the bed of the studied segment there are two formed mud tanks, one at upstream (between sections 6 - 10) and the other in the medium (sections 24 and 25). Particularly, in the case of addition of a dam at upstream of the studied segment and for liquid flows of recurrence of 10, 20 and 100 years, the mud tank in the medium is disappeared and a new mud tank was formed at downstream (sections 41 and 42). As other notices we noted that in the case of addition of a dam at upstream of the studied segment, the bed of this segment tends to grow hollow everywhere. On the contrary, for the case where if there were to be a strong deforestation in the basin of Nam Ngum, the bed of the selected segment tends this time to fill.

For the three cases of study and the recurrences mentionées above, the quantity of the sediments entering and leaving the studied segment after 35 days of simulation of the sedimentary evolution is studied. The accumulated quantity of sediments which leaves the section studied after 35 days of simulation for the three cases of study was compared and confirms that it rise in the case of deforestation on the basin of Nam Ngum.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES ANNEXES	xvii
 INTRODUCTION	 1
 CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIE	 5
1.1 Théorie du transport des sédiments	5
1.1.1 Calcul de la vitesse de chute	6
1.1.2 Calcul la tension de frottement critique	8
1.1.3 Équation de continuité de sédiments	12
1.1.4 Formules de transport total de fond	14
1.1.4.1 Formule de Graf et Acaroglu	15
1.1.4.2 Formule d'Ackers – White (1973)	16
1.1.4.3 Formule d'Engelund – Hansen (1972)	18
1.1.4.4 Formule de Yang (1973)	19
1.1.4.5 Formule de Yang (1979) et (1984)	20
1.2 Revue des études de la Nam Ngum.....	22
 CHAPITRE II : DONNÉES HYDROLOGIQUES	 24
2.1 Définitions des caractéristiques physiques du bassin et de la Nam Ngum	24
2.1.1 Le bassin-versant	24
2.1.2 La rivière	25

2.2	Données utilisées	26
2.2.1	Données de débits et de niveaux	26
2.2.2	Réglage des coefficients de rugosité de Manning	31
2.3	Profil longitudinal de la ligne d'eau	33
CHAPITRE III : DONNÉES SÉDIMENTOLOGIQUES		38
3.1	Caractéristiques des matériaux	39
3.2	Concentration en sédiments	40
3.3	Débit solide moyen annuel	44
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET ANALYSE		49
4.1	Situation existante	52
4.2	Ajout d'un barrage sur la rivière	64
4.3	Déforestation	77
4.3.1	Pourquoi la déforestation ?	77
4.3.2	Effet de la déforestation	78
4.4	Discussion.....	89
CHAPITRE V : CONCLUSION		97
BIBLIOGRAPHIE		101
ANNEXES		108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Analyse log-normal de la fréquence du débit moyen annuel.....	30
Tableau 2.2	Analyse log-normal de la fréquence du débit maximal annuel.....	30
Tableau 2.3	Analyse log-normal de la fréquence du niveau moyen annuel.....	30
Tableau 2.4	Analyse log-normal de la fréquence du niveau maximal annuel.....	31
Tableau 3.1	Débits solides moyens mensuels et annuels pour la période 1987-1990 à Tha Lat	47
Tableau 3.2	Débits solides moyens mensuels et annuels pour la période 1987-1988 à Tha Ngone	48
Tableau 4.1	Vitesse d'écoulement et quantité des sédiments entrants et quittants du tronçon Tha Lat- Pak Ngum après 35 jours de la simulation pour le cas de situation existante	93
Tableau 4.2	Vitesse d'écoulement et quantité des sédiments entrants et quittants du tronçon Tha Lat- Pak Ngum après 35 jours de la simulation pour le cas d'ajout d'un barrage sur rivière.....	94
Tableau 4.3	Vitesse d'écoulement et quantité des sédiments entrants et quittants du tronçon Tha Lat- Pak Ngum après 35 jours de la simulation pour le cas de déforestation	94

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Rivière Nam Ngum et son bassin - versant.....	25
Figure 2.2	Niveau de l'eau du bief Tha Lat-Pak Ngum pour le 25 août 1987	33
Figure 2.3	Ligne d'eau dans le bief Tha Lat-Pak Ngum pour des débits moyens et maximaux de récurrence de 2 ans	35
Figure 2.4	Ligne d'eau dans le bief Tha Lat-Pak Ngum pour des débits moyens et maximaux de récurrence de 10 ans	36
Figure 2.5	Ligne d'eau dans le bief Tha Lat-Pak Ngum pour des débits moyens et maximaux de récurrence de 20 ans	36
Figure 2.6	Ligne d'eau dans le bief Tha Lat-Pak Ngum pour des débits moyens et maximaux de récurrence de 100 ans	37
Figure 3.1	Courbe granulométrique des matériaux de la Nam Ngum	39
Figure 3.2	Courbe de concentration en fonction du débit liquide : a) à Tha Lat; b) à Tha Ngone.....	43
Figure 3.3	Courbe de débit solide en fonction du débit liquide : a) à Tha Lat; b) à Tha Ngone	45
Figure 3.4	Sédimentogramme de la Nam Ngum : a) à Tha Lat (1987-1989); b) à Tha Ngone (1987-1988).....	45
Figure 3.5	Débit solide moyen mensuel de la Nam Ngum: a) à Tha Lat pour la période 1987 –1989; b) à Tha Ngone pour la période 1987 –1988...	46
Figure 4.1	Hydrogramme de la Nam Ngum à Tha Lat	50
Figure 4.2	Comparaison la ligne d'eau du bief Tha Lat-Pak Ngum de la Nam Ngum pour la récurrence de 2 ans : a) par le modèle HEC-RAS; b) par le modèle GSTARS 2.0	51
Figure 4.3	Schéma de la simulation du tronçon Tha Lat- Pak Ngum	52
Figure 4.4	Courbe d'évolution du lit des sections 6, 7, 24 et 25 du bief Tha Lat- Pak Ngum pour la récurrence de 2 ans (situation existante).....	53
Figure 4.5	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la	

	réurrence de 2 ans (situation existante).....	54
Figure 4.6	Courbe d'incision du lit des sections en amont pour la réurrence de 2 ans (situation existante).....	54
Figure 4.7	Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la réurrence de 2 ans (situation existante).....	55
Figure 4.8	Courbe de dépôt des sédiments dans le tronçon entre les sections 1 et 24 pour la réurrence de 2 ans (situation existante).....	56
Figure 4.9	Courbe d'évolution du lit des sections 6, 7, 24 et 25 du bief Tha Lat- Pak Ngum pour la réurrence de 10 ans (situation existante).....	57
Figure 4.10	Courbe d'évolution du lit des sections 6, 7, 24 et 25 du bief Tha Lat- Pak Ngum pour la réurrence de 20 ans (situation existante).....	57
Figure 4.11	Courbe d'évolution du lit des sections 6, 7, 24 et 25 du bief Tha Lat- Pak Ngum pour la réurrence de 100 ans (situation existante).....	58
Figure 4.12	Courbe d'incision du lit des sections en amont pour la réurrence de 10 ans (situation existante).....	59
Figure 4.13	Courbe d'incision du lit des sections en amont pour la réurrence de 20 ans (situation existante).....	59
Figure 4.14	Courbe d'incision du lit des sections en amont pour la réurrence de 100 ans (situation existante).....	60
Figure 4.15	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la réurrence de 10 ans (situation existante).....	60
Figure 4.16	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la réurrence de 20 ans (situation existante).....	61
Figure 4.17	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la réurrence de 100 ans (situation existante).....	61
Figure 4.18	Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la réurrence de 10 ans (situation existante).....	62
Figure 4.19	Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la réurrence de 20 ans (situation existante).....	62

Figure 4.20	Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la récurrence de 100 ans (situation existante).....	63
Figure 4.21	Courbe de dépôt des sédiments dans le tronçon entre les sections 1 et 24 pour la récurrence de 10, 20 et 100 ans (situation existante).....	63
Figure 4.22	Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 24 et 25 pour la récurrence de 2 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	65
Figure 4.23	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 2 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	66
Figure 4.24	Courbe d'incision du lit des sections en amont pour la récurrence de 2 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	67
Figure 4.25	Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la récurrence de 2 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	67
Figure 4.26	Courbe de quantité d'érosion entre les sections 1 et 24 pour la récurrence de 2 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	68
Figure 4.27	Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 41 et 42 pour la récurrence de 10 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	69
Figure 4.28	Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 41 et 42 pour la récurrence de 20 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	69
Figure 4.29	Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 41 et 42 pour la récurrence de 100 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	70
Figure 4.30	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 10 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	70
Figure 4.31	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 20 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	71
Figure 4.32	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 100 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	71
Figure 4.33	Courbe d'incision du lit des quatre premières sections en amont pour la récurrence de 10 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	72
Figure 4.34	Courbe d'incision du lit des quatre premières sections en amont pour	

	la récurrence de 20 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	73
Figure 4.35	Courbe d'incision du lit des sections 1, 2, 34 et 38 pour la récurrence de 100 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	73
Figure 4.36	Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 10 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	74
Figure 4.37	Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 20 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	74
Figure 4.38	Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 100 ans (ajout d'un barrage sur la rivière).....	75
Figure 4.39	Courbe de quantité d'érosion entre les sections 1 et 24 pour la récurrence de 10, 20 et 100 ans (ajout d'un barrage sur la rivière)....	76
Figure 4.40	Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 24 et 25 pour la récurrence de 2 ans (déforestation).....	79
Figure 4.41	Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 24 et 25 pour la récurrence de 10 ans (déforestation).....	80
Figure 4.42	Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 24 et 25 pour la récurrence de 20 ans (déforestation).....	80
Figure 4.43	Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 24 et 25 pour la récurrence de 100ans (déforestation).....	81
Figure 4.44	Courbe d'incision du lit de cinq premières sections en amont pour la récurrence de 2 ans (déforestation).....	82
Figure 4.45	Courbe d'incision du lit de cinq premières sections en amont pour la récurrence de 10 ans (déforestation).....	82
Figure 4.46	Courbe d'incision du lit de cinq premières sections en amont pour la récurrence de 20 ans (déforestation).....	83
Figure 4.47	Courbe d'incision du lit de cinq premières sections en amont pour la récurrence de 100 ans (déforestation).....	83
Figure 4.48	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 2 ans (déforestation).....	84

Figure 4.49	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 10 ans (déforestation).....	84
Figure 4.50	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 20 ans (déforestation).....	85
Figure 4.51	Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 100 ans (déforestation).....	85
Figure 4.52	Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 2 ans (déforestation).....	86
Figure 4.53	Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 10 ans (déforestation).....	87
Figure 4.54	Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 20 ans (déforestation).....	87
Figure 4.55	Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 100 ans (déforestation).....	88
Figure 4.56	Courbe de dépôt des sédiments dans le tronçon Tha Lat- Pak Ngum pour la récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans (déforestation)	89
Figure 4.57	Comparaison des débits solides de trois cas d'études pour la récurrence de 10 ans dans : a) la section 1; b) la section 25	90
Figure 4.58	Comparaison l'évolution du lit le long de profile longitudinal du bief Tha Lat- Pak Ngum pour la récurrence de 10 ans : a) par l'équation de Yang (1979); b) par l'équation d'Ackers-White (1990)	92
Figure 4.59	Courbe de sédiments quittants le tronçon Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans et pour le cas de situation existante	95
Figure 4.60	Courbe de sédiments quittants le tronçon Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans et pour le cas d'ajout d'un barrage sur la rivière	95
Figure 4.61	Courbe de sédiments quittants le tronçon Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans et pour le cas de déforestation ...	96

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 :	Calcul des débits moyens annuels de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans à Tha Lat.....	108
Annexe 2 :	Calcul des débits maximaux annuels de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans à Tha Lat.....	110
Annexe 3:	Calcul des niveaux moyens annuels de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans à Pak Ngum	112
Annexe 4 :	Calcul des niveaux maximaux annuels de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans à pak ngum	114

INTRODUCTION

Les écoulements en rivière et le transport des sédiments qu'ils induisent ont fait l'objet d'un très important effort de recherche au cours des années, peut-être plus intense et plus suivi que dans n'importe quel autre domaine de l'hydraulique fluviale. Dans la pratique, une grande variété de situations peut se présenter notamment la morphologie de chaque rivière, les crues, la quantité des sédiments, la différenciation entre les transports en charriage et en suspension, etc. Étant donné le grand nombre de variables en jeu et la grande diversité des combinaisons possibles, la recherche de la situation optimale exige du projeteur une bonne connaissance de la théorie des phénomènes, une vision synthétique des différentes disciplines en cause. Sont associés à cet effort les hydrologues, des hydrauliciens, des sédimentologues, ainsi que des ingénieurs civils, etc.

D'après plusieurs études sur le transport solide, la matière première du débit solide dans les cours d'eau vient de l'érosion de surface, c'est-à-dire la désagrégation du sol suite aux diverses activités humaines, le vent, l'impact des gouttes de pluie, le ruissellement, etc. Lorsque les matériaux arrachés ont atteint le cours d'eau, ils sont alors transportés par le courant si celui-ci en est capable; sinon ils se déposeront pour constituer la partie affouillable du lit des rivières. Compte tenu des caractéristiques spécifiques des matériaux transportés et des caractéristiques de rugosité du lit, la possibilité de transport de la rivière, exprimée en tonnes par jour, dépend de la répartition des vitesses dans la section considérée, c'est-à-dire la plupart du temps du seul débit liquide. Cette possibilité varie constamment d'amont en aval de la rivière, puisque la loi de répartition des vitesses n'est pas la même pour un débit donné à toutes les sections. Elle varie également dans le temps, à une section donnée, avec le débit liquide. Cette possibilité est appelée *capacité de transport solide*.

Si tout au long du parcours la charge solide est toujours inférieure à la capacité de transport, l'eau conservera un reliquat d'énergie qui pourra être utilisé au creusement du

lit. Si au contraire en un point du profil en long la capacité de transport tombe en dessous de la charge, une partie des matériaux va se déposer. Dans le cas général d'une rivière à fort débit solide, on assiste en fait à une série de remblaiements et d'affouillements répartis dans le temps et dans l'espace. Souvent, une rivière a tendance à affouiller aux forts débits et à alluvionner aux faibles débits; ce qui s'explique par la variation de la capacité de transport avec le débit liquide et se caractérise par une forte turbidité pendant les crues et des eaux limpides à l'étiage.

D'une façon générale, nous pouvons dire qu'une rivière affouillable est stable ou en équilibre hydromorphologique lorsque les affouillements sont approximativement compensés en tous points du lit par les dépôts. Au contraire, une rivière instable est celle qui est à la recherche de son équilibre, soit en creusant son lit par affouillement, soit en l'exhaussant par alluvionnement. De toutes façons, ces caractéristiques sont toujours provisoires pour un cours d'eau naturel mais leurs évolutions peuvent varier et dépendre largement des activités humaines.

Ce mémoire tente d'élaborer un modèle d'évolution sédimentaire pour un segment de rivière. Le but est d'établir les évolutions sédimentaires d'un segment de rivière en calculant les évolutions des fonds (érosions, dépôts), leur rythme, leur cycle annuel, leurs évolutions accidentelles (crue exceptionnelle) et la charge sédimentaire transmise en aval. Ce calcul se fait pour les débits typiques annuels et en fonction des charges sédimentaires parvenant aux sites d'étude par l'amont et le bassin. On y considère trois cas typiques : les conditions actuelles, l'effet de la construction d'un barrage et l'effet de la déforestation.

Un cas type a été traité pour une rivière réelle située au Laos (Nam Ngum). Le segment Tha Lat – Pak Ngum que nous avons traité est un segment situé en aval de la Nam Ngum. La longueur totale de ce segment est 162 km environ jusqu'au fleuve Mékong.

Ce mémoire comprend cinq chapitres et quatre annexes organisés de la manière suivante:

Au chapitre I ***Revue bibliographique***, nous présentons, d'abord, les équations mathématiques nécessaires pour le calcul des vitesses de chute et des tensions de frottement critique. Ensuite, nous exposons l'équation de conservation de masse (équation de continuité) pour des sédiments et quelques solutions de cette équation. Les formules pour le calcul du débit solide sont exposées, ainsi que leur domaine d'application. Enfin, nous abordons une revue bibliographique et un résumé des documents utilisés pour caractériser la Nam Ngum.

Au chapitre II ***Données hydrologiques***, nous définissons les caractéristiques physiques du bassin de la Nam Ngum et du segment étudié. Ainsi, nous exposons le calcul des débits liquides et des niveaux maximaux annuels pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans à Tha Lat (amont) et à Pak Ngum (aval) du segment étudié. Le réglage des coefficients de rugosité de Manning est également exposé.

Au chapitre III ***Données sédimentologiques***, nous développons premièrement, l'équation pour calculer la concentration des sédiments en fonction du débit liquide dans le segment étudié de la Nam Ngum. Ensuite, à partir des données mesurées, nous développons l'équation qui relie le débit solide et le débit liquide, de manière à pouvoir calculer le débit solide à Tha Lat et à Tha Ngone (milieu) du segment étudié. Enfin, les débits solides mensuels et annuels à Tha Lat pour la période 1987-1990 et à Tha Ngone (1987-1988) du segment étudié sont également calculés.

Au chapitre IV ***Résultats et analyse***, nous traitons trois cas d'étude de la façon suivante: Premièrement, nous analysons l'évolution sédimentaire le long du lit du segment étudié pour la situation existante. Deuxièmement, nous abordons la même question en supposant qu'un barrage est construit en amont du segment étudié.

Enfin, nous interprétons l'évolution du lit du segment choisi s'il devait y avoir une forte déforestation dans le bassin de la Nam Ngum.

Au chapitre V *Conclusion*, nous confirmons encore une fois les conclusions importantes des résultats obtenus des chapitres précédents. Aussi, nous évaluons d'une manière générale quelques impacts de l'érosion et de la déposition sur l'environnement, la vie riveraine et l'activité économique d'un pays. À la fin de ce chapitre, nous proposons quelques principes essentiels de contrôle de l'érosion et des sédiments.

Enfin, quatre annexes sont consacrées aux calculs des débits et des niveaux moyens et maximaux annuels à Tha Lat (amont) et à Pak Ngum (aval) du segment étudié.

CHAPITRE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Le lit des cours d'eau naturels est rarement de forme invariable et c'est là une des difficultés de leur étude. De plus le mouvement de sédiments faisant que le cours d'eau naturel a un lit mobile ne manque pas de complexité. De nombreux ouvrages de référence traitent du transport solide en rivière et des phénomènes d'érosion et de dépôt. Parmi les ouvrages consultés sur ce sujet, nous citons: *Sediment Transport And River Morphologic Changes* (Yang, 1999); *Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport, Part II: Suspended Load Transport* (Van Rijn, 1984); *User's Manual For GSTARS 2.0* (Yang et al, 1998); *Transport de sédiments* (Graf.W.H, Tome 2, 1993); *Cohesive Sediment Transport* (Mehta.A.J et al, 1989), *Sediment Transport: New Approach And Analysis* (Ackers-White, 1973), etc.

La bibliographie présentée ici ne porte que sur les points particuliers dont la connaissance est fondamentale pour la réalisation de cette étude, c'est-à-dire la vitesse de chute, la tension de frottement critique, le principe de conservation des sédiments et les quelques modèles reconnus pouvant servir à modéliser les cours d'eau sur de longues périodes. La bibliographie compte également des documents utilisés pour caractériser la Nam Ngum.

1.1 Théorie du transport des sédiments

Le transport des sédiments est un équilibre entre leur arrachement, leur mélange avec les eaux et leur décantation possible. Il est donc important de comprendre le rôle de la vitesse de chute, de la tension de frottement et la formulation de la conservation des sédiments.

1.1.1 Calcul de la vitesse de chute

En général, la vitesse de chute des particules des sédiments peut être calculée par différentes formules qui dépendent de l'équation de transport des sédiments utilisée. Lorsque la vitesse limite de chute est lente, c'est-à-dire pour les faibles valeurs du nombre de Reynolds rapporté à la particule, nous pouvons appliquer la formule de Stokes qui lie le diamètre d à la vitesse de chute w_s ,

$$w_s^2 = \frac{A}{C_D} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d \quad (1.1)$$

Où A = constante (facteur de la forme);

d = diamètre de particule;

ρ_s et ρ = respectivement, densités du solide et de l'eau et

C_D = coefficient de traînée.

g = accélération gravitationnelle

Si la chute est turbulente (particules grossières), le coefficient de traînée n'est plus constant, mais il peut être évalué par l'expression:

$$C_D = \frac{24}{R_e} = \frac{24\nu}{w_s d} \quad (1.2)$$

L'équation (1.1) devient alors :

$$w_s = \frac{A}{24} \frac{\rho_s - \rho}{\rho \nu} g d^2 \quad (1.3)$$

Où R_e = nombre de Reynolds; et

ν = coefficient viscosité cinématique de l'eau.

D'après Yang (1998) et l'application faite dans le modèle GSTARS 2.0, le coefficient de viscosité cinématique de l'eau est calculé à partir de la température T par la formule suivante :

$$\nu = \frac{1.729 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 T + 0.000221 T^2} \quad (1.4)$$

Où : T en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$) et
 ν en m^2/s .

Pour les particules dont le diamètre est plus grand que 10 mm et le facteur de forme $SF = 0.7$, la vitesse de chute w_s en (cm/s) est calculée par la formule ci-après :

$$w_s = 1.1 \sqrt{(s-1)gd} \quad (1.5)$$

Nous calculons aussi la vitesse de sédimentation pour les particules de diamètre entre 1 et 62.5 μm en utilisant la formule ci-dessous :

$$w_s = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \quad (1.6)$$

Où : s = densité spécifique de sédiments ayant la valeur 2.65

D'après Nian-Sheng Cheng (1997), la vitesse de chute de particules des sédiments dans le cours d'eau naturel ayant un nombre de Reynolds $100 > R_e > 1$, peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$\frac{w_s d}{\nu} = \left(\sqrt{25 + 1.2 d_*^2} - 5 \right)^{1.5} \quad (1.6a)$$

$$d_* = \left(\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho \nu^2} \right)^{1/3} d; \quad C_D = \frac{4 d_*^3}{3 R_e^2}$$

En comparant avec les résultats d'expériences publiés, la formule proposée donne un très bon résultat.

1.1.2 Calcul de la tension de frottement critique

Le transport de sédiments représente un phénomène important de l'hydraulique fluviale. Toutefois, ce phénomène est très complexe et par conséquent, son étude ne peut être menée théoriquement que dans les cas simples ou simplifiés. Les formules que l'on connaît actuellement se basent sur les résultats expérimentaux assez limités et ne peuvent être utilisées qu'avec beaucoup de prudence. De telles formules, d'une importance certaine pour l'ingénieur hydraulicien, doivent de préférence être utilisées dans les conditions hydrauliques pour lesquelles chacune a été établie.

La tension de frottement représente l'action motrice du mouvement des sédiments. L'équation de cette tension établie par démonstration mathématique se présente comme suit :

$$\tau = \rho g R_h S_e \quad (1.7)$$

Où : τ = tension de frottement unitaire exprimée en N/m^2 ;

g = accélération de la pesanteur en m/s^2 ;

R_h = rayon hydraulique en m et

S_e = pente de la ligne d'énergie.

Nous considérons, pour les rivières d'une certaine importance, que la pente d'énergie est voisine de la pente du plan d'eau et que le rayon hydraulique est très proche de la profondeur moyenne.

Il est également possible d'évaluer la tension de frottement par une approche basée sur la vitesse de frottement (u_*). Cette dernière, qui est une mesure de l'effet de cisaillement sur le fond, est définie par la relation suivante :

$$u_* = \sqrt{\tau / \rho} \quad (1.8)$$

La vitesse de frottement peut être déterminée à partir de la distribution des vitesses en fonction de la profondeur, qui obéit généralement à une distribution logarithmique :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \quad (1.9)$$

Où y = distance du fond où la vitesse u a été mesurée;

k = constante de Von Karman égal à 0.4; et

y_0 = un paramètre de rugosité.

Les expériences de Nikuradse ont montré que la hauteur de rugosité y_0 est égale à $k_s / 30$ (où k_s représente le paramètre de rugosité des sables de Nikuradse) dans le cas de lits immobiles et plats, avec $k_s = d$.

Les valeurs des tensions de frottement nécessaires à la mise en mouvement d'une particule de diamètre donné ont été initialement basées sur des expériences effectuées dans des canaux à fond sableux. La relation la plus utilisée est la fonction de Shields (Graf, 1971) qui donne une relation adimensionnelle entre la densité du sédiment (ρ_s), le diamètre des grains (d), la densité du fluide (ρ), la viscosité cinématique (ν), l'accélération due à la gravité (g) et la tension de frottement exercée par le fluide sur un grain. De sorte que :

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd} = fct\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \quad (1.10)$$

Où : θ_c = fonction d'entraînement de Shields dont la valeur critique à besoin d'être connue, afin que cette relation puisse être résolue pour une particule d'un diamètre donné et

$R_e^* = u_* d / \nu$ est le nombre de Reynolds de frottement.

Une courbe moyenne (Graf, 1993) assez bien définie caractérise le début de l'érosion exprimé par θ_c . Le diamètre médian d_{50} est généralement utilisé pour caractériser en matériau granulaire sur cette courbe. A noter que le seuil critique se situe approximativement entre : $0.03 < \theta_c < 0.06$

L'utilisation de la relation de Shields, l'équation 1.10, n'est pas simple. Yalin (1972, p.82) a proposé d'éliminer cet inconvénient par la combinaison de :

$$\frac{R_e^{*2}}{\theta_c} = \frac{d^3 g (\rho_s - \rho)}{\nu^2 \rho} \quad (1.11)$$

Plutôt que d'utiliser R_e^* , Yalin propose d'utiliser un diamètre adimensionnel de grains :

$$d_* = d \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3}$$

L'équation 1.10 s'écrit alors :

$$\theta_c = f(d_*) \quad (1.12)$$

Nous prenons $d = d_{50}$. Si nous connaissons les propriétés du fluide ρ et ν et celles du grain ρ_s et d , nous pourrions facilement déterminer la valeur de θ_c et ensuite la valeur de τ_c .

Dans une étude expérimentale avec des grains de $0.49 < d_{50} \text{ (mm)} < 3.02$, Graf et collaborateurs ont exprimé les valeurs critiques par la tension de frottement τ_c (Graf, 1993). Ils ont trouvé que :

$$\tau_{cD} < \tau_{cE}.$$

Où : τ_{cD} = tension de frottement critique de déposition et

τ_{cE} = tension de frottement critique de l'érosion.

Généralement, l'érosion et la déposition dans un cours d'eau sont contrôlées par la valeur de la tension de frottement de fond τ_b . Lorsque la valeur de τ_b est plus petite que celle critique τ_{cD} , il y a déposition dans le fond. Au contraire, lorsque la valeur de τ_b est plus grande que celle critique τ_{cE} , il y a érosion du fond.

Pour les matériaux cohérents, la détermination de la valeur critique τ_c s'avère très difficile. Il faudrait alors avoir recours à des ouvrages spécialisés. Graf (1971, chap.12) a montré que la tension de frottement critique est fonction des propriétés de ces matériaux de la façon suivante :

$$\tau_c = fct(d, C_0)$$

Où C_0 est la cohésion. Pour un matériau dans lequel la force cohésive est plus grande que les autres forces, le coefficient C_0 est déterminé par la formule ci-dessous :

$$\frac{\tau}{(\rho_s - \rho)d} = C_0 \quad (1.13)$$

Dans cette équation la valeur de la tension de frottement τ est calculée par la formule (1.7), mentionnée ci-dessus.

En 1959, Smerdon et collaborateurs ont travaillé sur des expériences effectuées dans des canaux à fond de sols cohérents (Graf, 1993). Les propriétés des sols considérés sont

l'indice plasticité I_p , le diamètre moyen de particule d , le ratio de dispersion et le pourcentage d'argile. D'après eux, l'indice de plasticité joue un rôle très important dans la détermination de la tension de frottement critique. La relation entre la tension de frottement critique τ_c et l'indice plasticité I_p , a été montrée comme suit :

$$\tau_c = 0.0034(I_p)^{0.34} \quad (1.14)$$

Où : τ_c = tension de frottement critique en lb/ft².

Lorsque les sédiments contiennent des particules très fines comme les limons et les argiles (sédiments cohésifs), la valeur de la tension de frottement critique de déposition, τ_{cD} , n'est pas unique. Mehta et Partheniades ont trouvé que τ_{cD} a une valeur allant de 0.18 à 1.1 N/m² environ (Mehta et al, 1989).

1.1.3 Équation de continuité de sédiments

Nous présentons dans ce paragraphe l'équation de continuité pour un écoulement sur fond mobile avec entraînement de sédiments.

L'équation de continuité pour un écoulement unique dimensionnel, non permanent et non uniforme peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + (1 - p) \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} - q_s = 0 \quad (1.15)$$

Où p = porosité des grains du fond définie comme le rapport entre le volume de l'espace vide (occupé par l'eau) et le volume total;
 Q_s = débit solide volumique par mètre de largeur ;
 q_s = débit solide latéral;
 A_d = volume de sédiments du fond par unité de longueur et

A_s = volume de sédiments en suspension par unité de longueur.

Pour simplifier cette équation, dans le modèle GSTARS 2.0, les suppositions suivantes ont été faites : premièrement, en supposant que le changement de la concentration des sédiments en suspension dans chaque section du cours d'eau est plus petit que celui la concentration des sédiments du fond, c'est-à-dire :

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} \ll (1-p) \frac{\partial A_d}{\partial t} \quad (1.16)$$

Deuxièmement, tous les paramètres de la fonction du transport des sédiments, pour chaque pas de temps, ont été supposés constants, c'est-à-dire :

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial Q_s}{\partial x} = \frac{dQ_s}{dx}$$

Finalement, on suppose que le débit latéral $q_s = 0$, et la forme finale de l'équation de continuité pour sédiments est la suivante :

$$(1-p) \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{dQ_s}{dx} = 0 \quad (1.17)$$

Dans le modèle GSTARS 2.0, l'équation (1.17) a été résolue pour chaque tube du courant par la méthode numérique. Les méthodes implicites aux différences finies sont actuellement utilisées pour résoudre l'équation (1.17). Les termes dérivés partiels dans l'équation (1.17) ont été calculés approximativement comme suit :

$$\frac{\partial A_d}{\partial t} = \frac{(aP_{i-1} + bP_i + cP_{i+1})\Delta Z_i}{\Delta t} \quad (1.18)$$

$$\frac{dQ_s}{dx} = \frac{Q_{s_i} - Q_{s_{i-1}}}{1/2(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \quad (1.19)$$

$$\Delta Z_{ik} = \frac{2\Delta t(Q_{s_{i-1,k}} - Q_{s_{i,k}})}{\eta_i(aP_{i-1} + bP_i + cP_{i+1})(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \quad (1.20)$$

$$\Delta Z_i = \sum_{k=1}^{nsize} \Delta Z_{i,k} \quad (1.21)$$

Où k = index de la fraction des grains;

$\eta = (1-p)$;

P = périmètre mouillé;

ΔZ = changement de l'élévation du fond et

$nsize$ = nombre total de fractions des grains dans la i^e section;

a , b et c = constants qui doivent satisfaire :

$$a + b + c = 1 \quad (1.22)$$

Dans le modèle GSTARS 2.0, les valeurs par défaut sont les suivantes : $a = c = 0.25$ et $b = 0.5$. Mais dans tout cas, nous pouvons faire la combinaison de ces valeurs de manière à satisfaire la condition (1.22).

1.1.4 Formules de transport total de fond

Le transport total de sédiments par l'eau est l'ensemble du transport de particules solide qui passe dans une section du cours d'eau. Nous appelons *transport solide total de fond* le débit solide transporté par charriage q_{sb} et en suspension q_{ss} . Nous y ajoutons, éventuellement, le transport en suspension intrinsèque q_{sw} (terme anglais : wash load).

$$q_s = q_{sb} + q_{ss} + q_{sw} \quad (1.23)$$

Il existe plusieurs formules pouvant être utilisées pour une prédiction du transport solide total de fond. Les formules pour la détermination du débit solide total ne donnent des résultats satisfaisant que dans un domaine limité de paramètres. Leur application doit alors se faire avec beaucoup de prudence.

Voici une sélection des différentes formules existantes.

1.1.4.1 Formule de Graf et Acaroglu

Une relation pour la prédiction du transport total de fond, valable pour un cours d'eau à surface libre, a été développée par Graf et Acaroglu en 1968. D'après eux, un paramètre d'intensité adimensionnelle ψ_A de frottement a été proposé comme critère de transport solide (Graf, 1971) :

$$\psi_A = \frac{(s-1)d}{S_e R_h} \quad (1.24)$$

En utilisant le concept de la puissance (ou travail) d'un système à écoulement, un autre paramètre de transport solide Φ_A a été proposé (Graf, 1971), soit :

$$\Phi_A = \frac{C_s U R_h}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = \frac{\left(\frac{q_s}{q}\right) U R_h}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (1.25)$$

A noter que C_s est la concentration volumique dans la section et $d = d_{50}$ est le diamètre moyen; R_h est le rayon hydraulique; U est la vitesse moyenne d'écoulement; q_s est le débit solide unitaire; q est le débit liquide unitaire; s est la densité spécifique de sédiments et g est l'accélération gravitationnelle;

Il existe aussi une relation fonctionnelle entre ψ_A et Φ_A , soit :

$$\Phi_A = f(\Psi_A)$$

dont la forme a été déterminée expérimentalement. Avec près de 800 expériences en laboratoire et près de 80 expériences in situ pour les écoulements à surface libre, la relation suivante a été établie :

$$\phi_A = 10.39(\psi_A)^{-2.52} \quad (1.26)$$

Cette relation est valable pour $10^{-2} < \phi_A < 10^3$ ou $\psi_A \leq 14.6$. Une extension de l'étude de Graf et Acaroglu en 1968 a été fait par Graf et Suszka en 1987 (Graf, 1993, Tome 2):. Elle a donné lieu aux relations suivantes

$$\Phi_A = 10.4 K (\Psi_A)^{-1.5} \quad (1.26a)$$

<i>avec</i>	$K = \Psi_A^{-1}$	<i>si</i>	$\Psi_A \leq 14.6$
	$K = (1 - 0.045\Psi_A)^{2.5}$	<i>si</i>	$\Psi_A > 14.6$
	$K = 0$	<i>si</i>	$\Psi_A > 22.2$

Cette tendance, pour un transport solide très faible $10^{-5} < \phi_A < 10^{-2}$ avec $\psi_A > 14.6$, est aussi évidente dans d'autres expériences (Graf, 1993, Tome 2).

Les relations, équations 1.26 et 1.26a, sont valables pour un diamètre équivalent à $d = d_{50}$, si la granulométrie est non uniforme.

1.1.4.2 Formule d'Ackers - White (1973)

Ackers et White (1973) ont proposé des paramètres sédimentologiques, en utilisant des considérations physiques et d'analyse adimensionnelle.

Un paramètre de mobilité de sédiment est défini :

$$F_{gr} = U_* \left[g d \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \right]^{-1/2} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \log(10 h_m d)} \right]^{1-n} \quad (1.27)$$

Ils ont proposé, ensuite, le diamètre adimensionnel de particule :

$$d_{gr} = d \left[\frac{g(\gamma_s/\gamma - 1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (1.28)$$

Pour une granulométrie non uniforme, $d = d_{35}$ comme diamètre équivalent.

Enfin, ils ont proposé un paramètre de transport de sédiments :

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (1.29)$$

Le transport total se calcule par la formule suivante :

$$C_s = \frac{Q_s}{Q_t} = G_{gr} \frac{d^* s}{h_m} \left(\frac{V}{U_*} \right)^n \quad (1.30)$$

Où : C_s = concentration moyenne en volume dans la section;

h_m = profondeur moyenne;

V = vitesse moyenne de l'écoulement et

U_* = vitesse de frottement.

s = densité spécifique de sédiments

Les valeurs de A , C , m et n , ont été déterminées par régression, en utilisant près de 1000 expériences en laboratoire et près de 250 expériences in situ avec des sédiments granulométriquement uniformes et non uniformes de $0.04 < d_{50} \text{ (mm)} < 4.0$ et pour des écoulements à nombre de Froude $Fr < 0.8$. Ces coefficients ont été corrigés en 1990.

Leurs valeurs sont les suivantes (Yang et al, 1998):

	1973	1990
$1 < d_{gr} < 60$	$A = 0.23d^{-1/2} + 0.14$ $\log C = -3.53 + 2.86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2$ $m = 9.66d_{gr}^{-1} + 1.34$ $n = 1.0 - 0.56 \log d_{gr}$	$A = 0.23d^{-1/2} + 0.14$ $\log C = -3.46 + 2.79 \log d_{gr} - 0.98(\log d_{gr})^2$ $m = 6.83d_{gr}^{-1} + 1.67$ $n = 1.0 - 0.56 \log d_{gr}$
$d_{gr} > 60$	$A = 0.17$ $C = 0.025$ $m = 1.5$ $n = 0$	$A = 0.17$ $C = 0.025$ $m = 1.78$ $n = 0$

1.1.4.3 Formule d'Engelund et Hansen (1972)

En 1972, Engelund et Hansen ont proposé la fonction du transport solide suivante :

$$f'\phi = 0.1\theta^{2.5} \quad (1.31)$$

$$f' = \frac{2gS_e h}{V^2} \quad (1.32)$$

$$\phi = \frac{q_t}{\gamma_s} \left(\left[\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right] g d^3 \right)^{-1/2} \quad (1.33)$$

$$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad (1.34)$$

Où : S_e = pente énergétique;

V = vitesse moyenne de l'écoulement;

q_t = débit solide total en volume par unité de largeur;
 γ_s et γ = poids spécifiques de sédiments et d'eau, respectivement;
 d = d_{50} diamètre moyen des particules;
 h = profondeur d'eau et
 τ = tension de frottement du fond.

1.1.4.4 Formule de Yang (1973)

Yang (1973) a développé la formule pour le transport de sables ci-après:

$$\begin{aligned}
 \log C_{ts} = & 5.543 - 0.286 \log \frac{w_s d}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{w_s} \\
 & + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{w_s d}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{w} \right) \log \left(\frac{VS_e}{w} - \frac{V_{cr} S_e}{w} \right) \quad (1.35)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{V_{cr}}{w_s} &= \frac{2.5}{\log(U_* d / \nu) - 0.66}; & \text{pour } 1.2 < \frac{U_* d}{\nu} < 70 \\
 \frac{V_{cr}}{w_s} &= 2.05 & \text{pour } 70 \leq \frac{U_* d}{\nu}
 \end{aligned}$$

Où : C_{ts} = concentration totale en volume des sables en parts par million (p.p.m);
 w_s = vitesse de sédimentation;
 d = diamètre de particule de sédiments;
 U_* = vitesse de frottement;
 VS_e = puissance unitaire de tube du courant
 V = vitesse moyenne de l'écoulement;
 S_e = pente énergétique et
 V_{cr} = vitesse moyenne critique de l'écoulement.

Tous les coefficients dans l'équation (1.35) ont été déterminés en utilisant 463 expériences en laboratoire. L'équation (1.35) peut être utilisée pour le transport des sédiments sableux de diamètre d plus petit que 2 mm. L'équation (1.35) a été développée pour des sédiments granulométriquement uniformes. Lorsque nous appliquons cette équation pour des sédiments non uniformes, la concentration totale de sédiments peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$C_t = \sum_{i=1}^N p_i C_i \quad (1.36)$$

Où : C_t = concentration totale de sédiments;
 p_i = pourcentage de i^{e} fraction des sédiments du fond;
 C_i = concentration de i^{e} fraction;
 N = nombre de fractions.

1.1.4.5 Formule de Yang (1979) et (1984)

En 1979 Yang a proposé la formule du transport des sédiments sableux dans lesquels la concentration en volume est plus grande que 100 parties par million:

$$\begin{aligned} \log C_{vs} = & 5.165 - 0.153 \log \frac{w_s d}{\nu} - 0.297 \log \frac{U_*}{w_s} \\ & + \left(1.78 - 0.36 \log \frac{U_*}{w_s} \right) \log \frac{VS_e}{w_s} \end{aligned} \quad (1.37)$$

Les coefficients dans l'équation (1.37) ont été déterminés en utilisant 452 expériences en laboratoire.

Ainsi, en 1984 Yang a développé la formule du transport des sédiments pour les graviers dans lesquels le diamètre d est égal à 2 mm ou est plus grand que 2 mm :

$$\log C_{tg} = 6.681 - 0.633 \log \frac{w_s d}{\nu} - 4.816 \log \frac{U_*}{w_s} + \left(2.784 - 0.305 \log \frac{w_s d}{\nu} - 0.282 \log \frac{U_*}{w_s} \right) \log \left(\frac{VS_e}{w_s} - \frac{V_{cr} S_e}{w_s} \right) \quad (1.38)$$

Où : C_{tg} = concentration totale de graviers en volume en parties par million (p.p.m)

Les coefficients dans l'équation (1.38) ont été déterminés en utilisant 167 expériences en laboratoire. L'équation (1.38) peut être appliquée pour les sédiments dont le diamètre est supérieur à 10 mm. Dans le modèle GSTARS 2.0, l'équation (1.38) a été modélisée pour des sédiments ayant un diamètre jusqu'à 100 mm. Selon la fraction donnée des sédiments, l'utilisateur peut utiliser les équations (1.35), (1.36), (1.37) et (1.38) pour calculer la concentration totale d'une rivière donnée. Dans le cas des sédiments granulométriquement non uniformes, l'équation (1.36) est valable aussi pour le modèle GSTARS 2.0.

Les équations de transport solide d'Ackers-White, d'Engelund-Hansen et de Yang mentionnées ci-dessus ont été modélisées dans le modèle GSTARS 2.0.

Dans le processus de simulation de l'évolution sédimentaire du segment étudié, nous avons choisi l'équation de transport solide de Yang (1979). Cette dernière a été choisie, parce que la différence des débits solides simulés avec cette équation à la section 1 (Tha Lat) et à la section 24 (Tha Ngone) est proche celle observée. Nous avons trouvé que la différence des débits solides simulés avec l'équation de Yang (1979) dans ces deux endroits est de 28 % à 34 %, selon la récurrence donnée. Cette différence est de 26.7 % pour des débits solides moyens mesurés de période 1987-1989. Selon un autre résultat de simulation en utilisant l'équation d'Ackers-White (1990), la différence mentionnée est de 11 % à 16.5 %. Cette dernière est de 33 % à 44.6 % selon les résultats de l'équation de Yang (1973). Alors, en comparant les résultats calculés avec les résultats

mesurés, nous avons trouvé que l'équation de Yang (1979) donnait le meilleur résultat, donc elle a été sélectionnée pour notre étude.

1.2 Revue des études de la Nam Ngum

En général, des données sédimentaires de la Nam Ngum ne sont pas nombreuses. Cependant, en 1986 une station de mesure a été établie en amont (Ban Naluang) du barrage Nam Ngum I pour collecter régulièrement les échantillons des sédiments entrant dans le réservoir. Les autres stations de mesure sont situées à Tha Ngone en aval du barrage, à Nam Lik à l'Ouest et à Nam Leuk au Sud du bassin de la Nam Ngum. En 1992 un groupe de l'Université de Uppsala (Axelsson, 1992) a fait l'analyse des données sédimentaires de la Nam Ngum et a trouvé que la charge sédimentaire totale annuelle se situait à 48 tonnes/km².an (2180 tonnes/jour) à Tha Ngone, 212 tonnes/km².an (2975 tonnes/jour) à Tha Lat et 345 tonnes/km².an à Nam Leuk (Hardén, 1997).

Selon ce groupe de recherche, les débits solides annuels totaux en amont du barrage sont 738 000 m³/an (2609 tonnes/jour) ou 202 tonnes/km².an. Pour la période 1987-1990 la concentration moyenne des sédiments dans le segment en amont du barrage de la Nam Ngum est 85 mg/l. La relation entre la concentration des sédiments et le débit liquide a été représentée par la fonction linéaire suivante:

$$C = 0.1927 Q + 31.926 \quad (1.39)$$

En ce qui concerne la relation entre le débit solide et le débit liquide en amont (Ban Naluang) du barrage a été représentée par la formule ci-après :

$$Q_s = 0.15627 Q^{1.6925} \quad (\text{tonnes/jour}) \quad (1.40)$$

Selon un autre groupe de recherche SMEC (MAF, 1998) on estime que, s'il y avait une forte déforestation dans le bassin de la Nam Ngum, la charge sédimentaire totale dans le tronçon en amont de la Nam Ngum pourrait atteindre 4500 tonnes/jour.

CHAPITRE II

DONNÉES HYDROLOGIQUES

2.1 Définitions des caractéristiques physiques du bassin et de la Nam Ngum

L'analyse des phénomènes hydrologiques en général et des composantes du cycle hydrologique en particulier d'une rivière est considérablement facilitée par l'adoption d'une unité géographique restreinte ayant certaines caractéristiques communes. Nous trouverons ces caractéristiques de la Nam Ngum et du segment étudié dans les paragraphes suivants.

2.1.1 Le bassin-versant

Le bassin le plus prometteur pour la mise en valeur de la zone est celui de la Nam Ngum. Ses caractéristiques jouent un rôle essentiel dans l'étude de certaines composantes du cycle hydrologique (écoulement, érosion, dépôt, etc.) de la Nam Ngum. Ce bassin est situé au centre du Laos. Il s'étire du Nord-Est au Sud-Ouest. La superficie totale de ce bassin est de 12605 km² et sa dénivellation moyenne est de 780m. La majeure partie de ce bassin est montagneuse, mais il y a aussi quelques grandes plaines : La plaine des Jarres, située en amont à une altitude d'environ 1100 m au-dessus du niveau moyen de la mer (NMM) la plaine de Vientiane qui s'étend du confluent de la Nam Ngum et son principal affluent la Nam Lik jusqu'au Mékong, et la vallée de la Nam Song près de la ville de Vang Vieng. La zone est en majeure partie boisée et peu peuplée. La plaine de Vientiane et la vallée de la Nam Song, densément peuplées et rizicoles, font exception. Les caractéristiques du bassin de la Nam Ngum sont très favorables au développement hydro-électrique et le potentiel d'irrigation dans la plaine de Vientiane est considérable.

2.1.2 La rivière

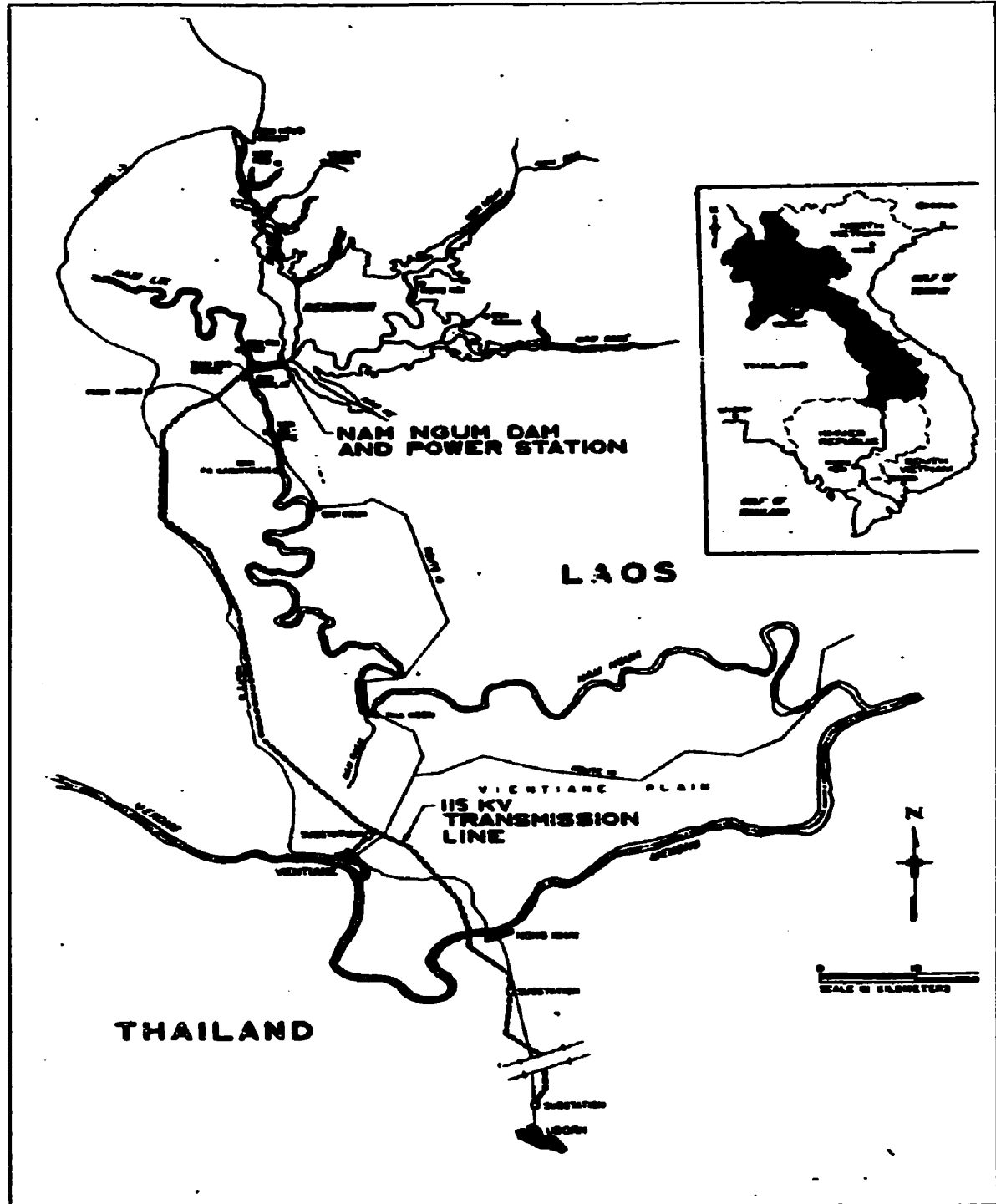


Figure 2.1.: Rivière Nam Ngum et son bassin-versant.

Au Laos, le réseau des rivières a été classé à partir de la cartographie de l'échelle 1 : 500 000. Le plus grand fleuve, le Mékong a été numéroté 0. Ensuite, les grandes rivières ont été numérotées 1. Parmi les grandes rivières, la Nam Ngum (figure 2.1) est une rivière très importante. Elle prend sa source dans la province de Xieng-khouang. Elle coule vers l'Est, traverse la plaine de Vientiane jusqu'au fleuve Mékong. Cette rivière a une longueur de 1403 km, sa largeur moyenne est de 175 mètres.

En ce qui concerne le segment étudié de la Nam Ngum, sa longueur est de 162 km environ jusqu'au Mékong. La pente moyenne de fond est de 0.00012. La largeur moyenne de ce segment est de 200 m environ. Le segment étudié est situé en aval de 3 km environ. du barrage Nam Ngum I.

Le principal affluent de la Nam Ngum est la Nam Lik. Ces deux rivières confluent à la première section en amont du segment étudié.

2.2 Données utilisées

Le débit de la Nam Ngum est variable et sa concentration en sédiments aussi. Pour comprendre les mécanismes d'évolution du lit, il faut travailler avec des débits caractérisant les crues, puisque ceux-ci sont les plus actifs en évolution sédimentaire.

Les données hydrologiques peuvent être exprimées en terme de probabilité. Ce procédé, universellement reconnu, est largement utilisé dans la pratique. Dans les projets de génie sur diverses structures hydrauliques, nous référons couramment aux débits ayant une période de récurrence donnée.

2.2.1 Données de débits et de niveaux

En raison de la position centrale du bassin - versant et des études effectuées pour les

projets de la Nam Ngum, un nombre assez important d'informations sur cette rivière sont disponibles. Des données de débits faites durant 20 années et celles de niveaux d'eau et de vitesse de l'écoulement rassemblées durant une dizaine d'années sont disponibles. Aussi, la carte topographique de la plaine de Vientiane à l'échelle 1 : 100 000 avec des courbes de niveau de 2 m ou 1 m, est disponible.

Le débit de la Nam Ngum est étroitement corrélé au type de précipitations. Il commence à augmenter au début de la saison des pluies (mai) pour atteindre une pointe en août, septembre et octobre. Après octobre le débit retombe rapidement et atteint son minimum en mars – avril.

En hydrologie, il existe de multiples possibilités de traitement des débits en fonction de la variable analysée (débit moyen annuel, débit moyen mensuel, évolution des débits en période de tarissement, etc.). Nous insisterons dans ce mémoire sur les débits susceptibles de jouer un rôle important en dynamique fluviale et plus spécialement dans l'évolution des lits. Il s'agit des débits de crue et des débits moyens annuels.

Dans le traitement des données, nous utilisons en général la loi de la distribution log-normale pour déterminer les débits et les niveaux de l'eau en amont et en aval du segment étudié de la Nam Ngum. Nous présenterons ici des débits et des niveaux de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans.

Nous avons calculé la moyenne arithmétique des débits et des niveaux par la formule suivante :

$$Y_i = \ln X_i ; Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i ; \quad (2.1)$$

Ensuite, nous avons calculé la variance des données par la formule :

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (Y_i - Y)^2; \quad (2.2)$$

le coefficient de variation standard des données (C_{vy}) et la déviation standard (g), ont été calculés par la formule ci-après :

$$C_{vy} = \frac{S_y}{Y}; \quad g = \frac{n \sum_1^n (Y_i - Y)^3}{(n-1)(n-2)S_y^3}; \quad (2.3)$$

Enfin nous avons déterminé des débits et des niveaux de l'eau de récurrence différente par la formule suivante :

$$Y_T = Y(1 + C_{vy}K_T) = Y + zS; \quad (2.4)$$

Où K_T est le facteur de fréquence à un niveau de probabilité donné. Nous pouvons donc en déduire que, pour une distribution normale, le facteur de fréquence est égal à l'écart normalisé z . Les valeurs de z peuvent être trouvées dans le Tableau 2-2 (McCuen, 1989).

Les résultats du calcul statistique des débits moyens annuels et des débits maximaux annuels à la première section en amont du segment étudié de la Nam Ngum sont présentés ci-dessous.

- Débit moyen annuel (voir Annexe 1)

Moyenne arithmétique, \bar{Y}	6.3505 m ³ /s
Variation standard, S_y	0.2245 m ³ /s
Coefficient de variation, C_{vy}	0.0354
Déviati on standard, g	0.4527

▪ Débit maximal annuel (voir Annexe 2)

Moyenne arithmétique, \bar{Y}	7.6109 m ³ /s
Variation standard, S_y	0.3467 m ³ /s
Coefficient de variation, C_{vy}	0.04556
Déviatation standard, g	1.1768

Les résultats du calcul statistique des niveaux moyens annuels et des niveaux maximaux annuels à la dernière section en aval du segment étudié de la Nam Ngum sont présentés ci – après :

▪ Niveau moyen annuel (voir Annexe 3)

Moyenne arithmétique, \bar{Y}	1.5580 m
Variation standard, S_y	0.1066 m
Coefficient de variation, C_{vy}	0.0684
Déviatation standard, g	-0.0688

▪ Niveau maximal annuel (voir Annexe 4)

Moyenne arithmétique, \bar{Y}	2.4514 m
Variation standard, S_y	0.1508 m
Coefficient de variation, C_{vy}	0.0615
Déviatation standard, g	-1.254

Les Tableaux 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4 résument les résultats de l'étude. La première colonne identifie les périodes de retour des événements. Les colonnes suivantes contiennent la probabilité associée à chacun des événements, le facteur de fréquence, les valeurs

logarithmiques des débits et des niveaux. La dernière colonne présente des débits et des niveaux estimés.

Tableau 2.1: Analyse log-normal de la fréquence du débit moyen annuel

T (ans)	pp _w	z	Y _i (m ³ /s)	Q _{moyen} (m ³ /s)
2	0.50	0.0214	6.53550	575
10	0.10	1.2817	6.63864	765
20	0.05	1.6458	6.72817	836
100	0.01	2.3267	6.89228	985

Tableau 2.2: Analyse log-normal de la fréquence du débit maximal annuel

T (ans)	pp _w	z	Y _i (m ³ /s)	Q _{max} (m ³ /s)
2	0.50	0.0214	7.62048	2039
10	0.10	1.2817	8.05533	3150
20	0.05	1.6458	8.19379	3618
100	0.01	2.3267	8.41756	4526

Tableau 2.3: Analyse log-normal de la fréquence du niveau moyen annuel

T (ans)	pp _w	z	Y _i (m)	H _{moyen} (m)
2	0.50	0.0214	1.558	4.75
10	0.10	1.2817	1.695	5.44
20	0.05	1.6458	1.733	5.66
100	0.01	2.3267	1.806	6.10

Tableau 2.4: Analyse log-normal de la fréquence du niveau maximal annuel

T (ans)	pp _w	z	Y, (m)	H _{max} , (m)
2	0.50	0.0214	2.4546	11.6
10	0.10	1.2817	2.645	14.0
20	0.05	1.6458	2.696	14.8
100	0.01	2.3267	2.799	16.4

2.2.2 Réglage des coefficients de rugosité de Manning

Chow (1959) a établi et écrit les facteurs qui affectent le coefficient de Manning n . Selon Chow, le coefficient n augmentera avec la dimension des matériaux et aussi avec la densité de la végétation sur le lit et les berges et la résistance due à la forme du lit créé par le charriage de sédiments. La résistance due à la forme du lit est aussi affectée par le débit et les conditions d'écoulement antérieures. Par exemple, des dunes peuvent se former dans le lit aux faibles débits et être emportées par la suite par de forts débits. La valeur de n diminue avec un accroissement du débit.

Toute variation dans la direction de l'écoulement et/ou dans la vitesse d'écoulement augmentera le coefficient de Manning, car la turbulence est augmentée. Des variations dans l'alignement (courbes, méandres) et dans la forme ou la dimension de la section transversale entraînent un accroissement des valeurs de n par rapport à celles d'un cours d'eau droit.

Évidemment, les obstructions créées par des troncs d'arbre et d'autres débris feront augmenter ainsi les valeurs de n .

Cowan (1956) a développé une technique d'évaluation de n qui fait intervenir plusieurs des facteurs affectant les valeurs de n . Cette technique permet de calculer la valeur de n

à l'aide de l'équation suivante :

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m$$

Où

n = valeur à utiliser;

n_0 = valeur de base pour un cours d'eau uniforme, droit et lisse quant aux matériaux naturels rencontrés;

n_1 = facteur de correction pour l'effet des irrégularités de surface;

n_2 = facteur de correction pour les variations dans la dimension et la forme du cours d'eau;

n_3 = facteur de correction pour l'effet des obstructions;

n_4 = facteur de correction pour la végétation et les conditions d'écoulement et

m = facteur de correction pour les méandres du cours d'eau.

Les valeurs de n_i et de m peuvent être tirées du tableau 8.14 (Gray, 1972). Les conditions s'appliquant à chaque valeur de n_i et de m sont expliquées par Chow (1959).

En se basant sur les facteurs mentionnés ci-dessus, nous avons déterminé dans ce mémoire le coefficient de Manning n par la méthode de réglage des niveaux observés le long du cours d'eau à l'aide d'un modèle d'hydraulique unidimensionnel et permanent HEC-RAS, jugé plus précis pour cette calibration que le modèle GSTARS 2.0. D'après le modèle HEC-RAS, nous avons trouvé que le coefficient de Manning n est 0.026 et 0.028 respectivement, dans le lit mineur et dans la plaine d'inondation. A titre d'exemple de validation du coefficient de Manning n nous avons simulé le niveau de l'eau du 25 août 1987 par le modèle HEC-RAS. Après la simulation, nous avons trouvé que le niveau de l'eau dans le segment étudié est presque le même que celui observé (la différence est de 4 cm à Tha Ngone). La figure 2.2 présente la simulation du niveau de l'eau du segment étudié de la Nam Ngum du 25 août 1987. Le niveau observé est égal à

168 m à Tha Lat (amont), 162.76 m à Tha Ngone (milieu) et 154.76 m à Pak Ngum (aval)

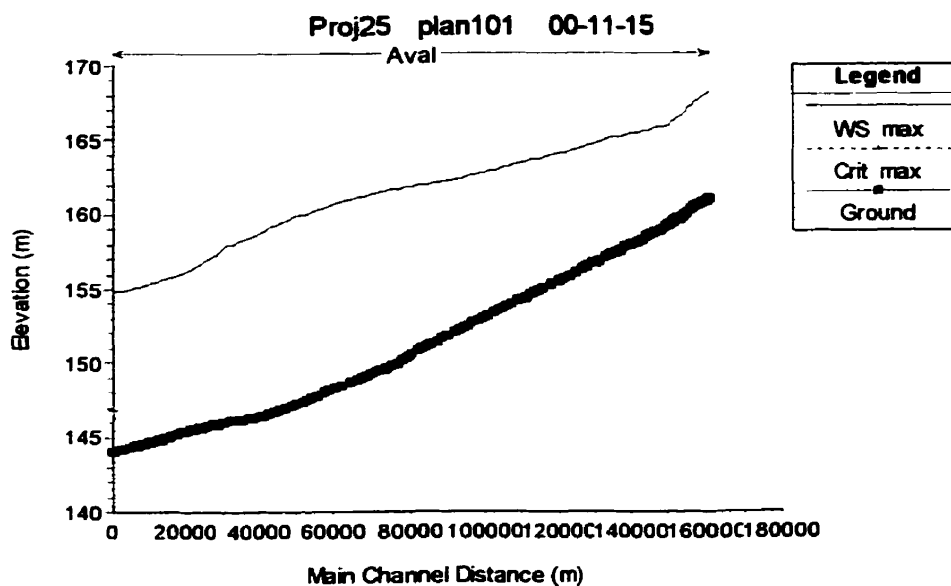


Figure 2.2: Niveau de l'eau du bief Tha Lat-Pak Ngum de la Nam Ngum pour le 25 août 1987.

2.3 Profil longitudinal de la ligne d'eau

Nous présentons dans ce paragraphe l'équation de base servant à calculer la ligne d'eau. Dans une rivière, nous considérons un bief en régime fluvial. Il existe toujours une relation univoque entre l'élévation de la ligne d'eau dans la section de contrôle aval et l'élévation de n'importe quelle autre section intermédiaire du bief, en régime permanent à condition qu'il n'y ait pas de changement de régime.

Parmi le grand nombre de méthodes existantes pour calculer la ligne d'eau d'une rivière, le modèle HEC-RAS calcule la ligne d'eau d'une section à l'autre par la méthode

d'itération en utilisant l'équation d'énergie. Cette équation peut être exprimée de la façon suivante :

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (2.5)$$

Où : $Y_1, Y_2,$ = profondeur d'eau dans sections 1 et 2;
 $Z_1, Z_2,$ = élévation de fond dans sections 1 et 2;
 $V_1, V_2,$ = vitesse moyenne dans sections 1 et 2;
 $\alpha_1, \alpha_2,$ = coefficients de répartition de la vitesse et
 h_e = perte de charge.

La perte de charge h_e entre deux sections comprend aussi la perte de charge singulière comme la contraction, l'expansion et la friction. L'équation de perte de charge est la suivante :

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2.6)$$

Où : L = distance entre deux sections;
 S_f = pente moyenne entre deux sections et
 C = coefficient de contraction ou d'expansion.

La distance entre deux sections est calculée par la formule ci- après :

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (2.7)$$

Où : L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} = distances entre deux sections, respectivement, à la rive gauche, dans le canal et à la rive droite;

Q_{lob} , Q_{ch} , Q_{lob} = débits moyens arithmétique entre deux sections, respectivement, la rive gauche, dans le canal et à la rive droit.

Les figures 2.3, 2.4, 2.5 et 2.6 montrent les lignes d'eau de la Nam Ngum (au Laos) calculées par le modèle HEC-RAS, pour des débits moyens et maximaux annuels de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans.

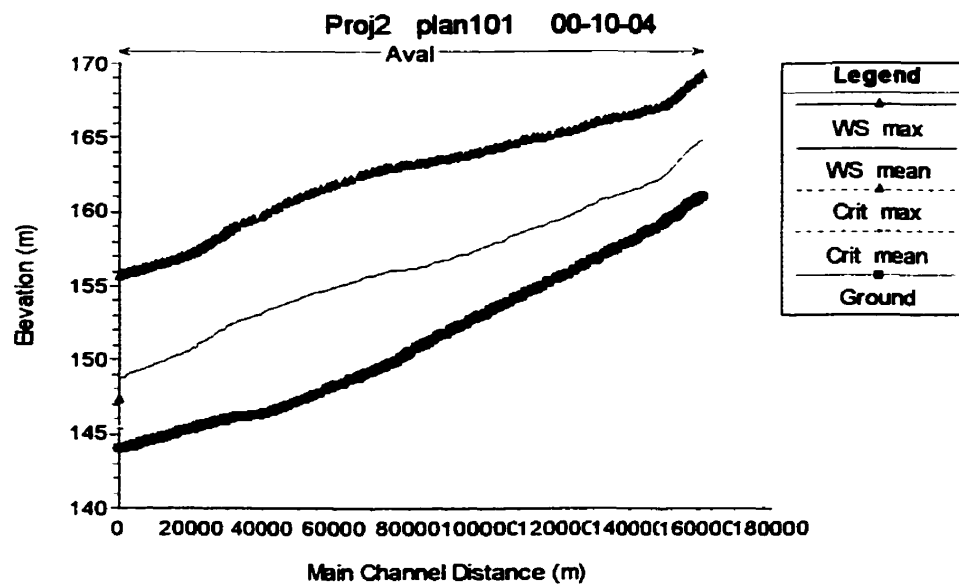


Figure 2.3 Ligne d'eau dans le bief Tha Lat - Pak Ngum pour des débits moyens et maximaux de récurrence de 2 ans.

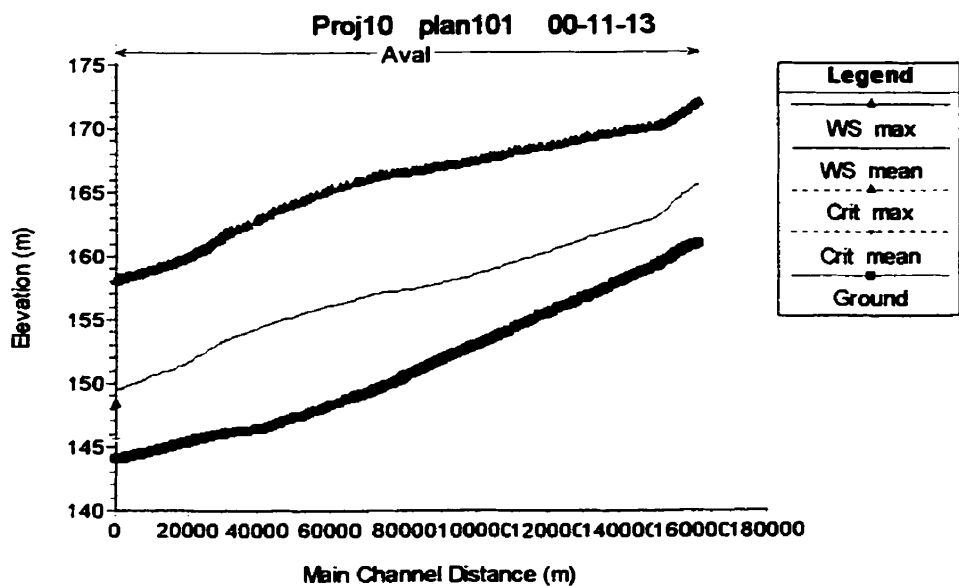


Figure 2.4 Ligne d'eau dans le bief Tha Lat - Pak Ngum pour des débits moyens et maximaux de récurrence de 10 ans.

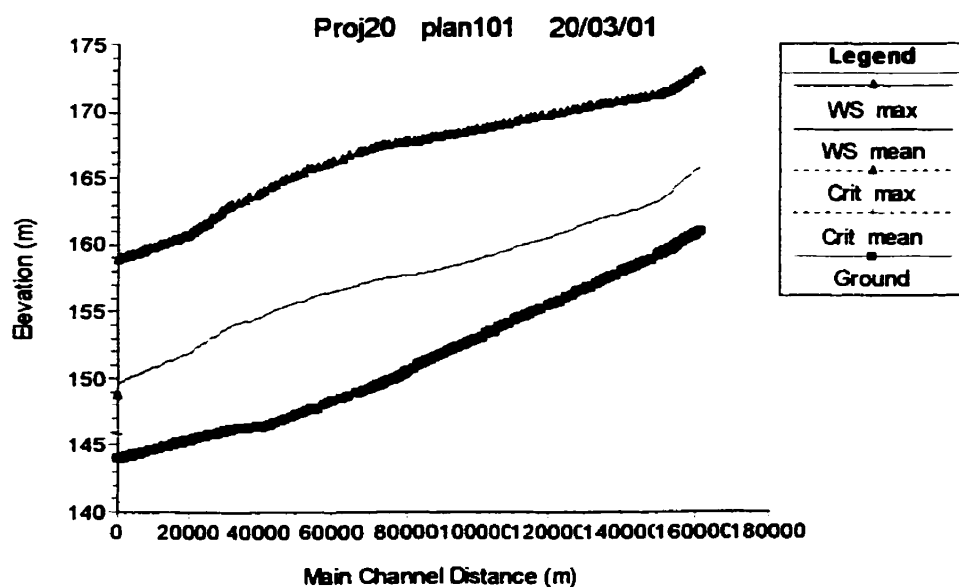


Figure 2.5 Ligne d'eau dans le bief Tha Lat - Pak Ngum pour des débits moyens et maximaux de récurrence de 20 ans.

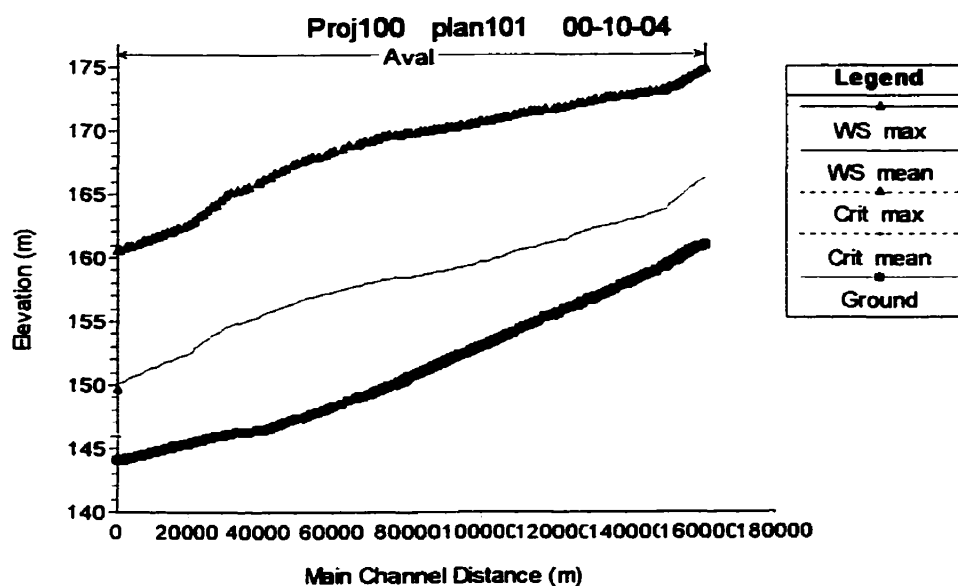


Figure 2.6 Ligne d'eau dans le bief Tha Lat - Pak Ngum pour des débits moyens et maximaux de récurrence de 100 ans.

Selon les quatre figures mentionnées ci-dessus, nous constatons que la ligne d'eau dans le tronçon Tha Lat - Pak Ngum de la Nam Ngum pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans a la même forme que celle du 25 août 1987, c'est-à-dire que les coefficients de rugosité de Manning n sont bien confirmés.

CHAPITRE III

DONNÉES SÉDIMENTOLOGIQUES

Le transport et la déposition des sédiments intéressent les hydrauliciens, car ils affectent tout l'aménagement global des cours d'eau. Ainsi, l'érosion peut enlever les sols fertiles; de même que l'érosion excessive ou la déposition de sol en surface peut contribuer à détruire la vocation agricole de la région qui est située au bord d'une rivière. Des variations dans le volume ou le taux de transport des sédiments peuvent entraîner des changements dans le régime d'écoulement des rivières. Des travaux effectués par l'homme sur un bassin versant peuvent augmenter ou diminuer l'érosion et la déposition des sédiments dans un cours d'eau. Ils peuvent aussi influencer le fonctionnement des structures de contrôle des eaux. Tous ces problèmes nécessitent une évaluation de l'érosion, c'est-à-dire des volumes et des taux de déposition des sédiments. Il est nécessaire de considérer l'effet des modifications des régimes d'écoulement, au regard du déplacement des sédiments.

Le transport des sédiments dans un cours d'eau naturel est un processus assez complexe. La façon d'obtenir les meilleurs résultats pour estimer la quantité de sédiments consiste encore à mesurer le taux de transport de sédiments. Cependant, quelques équations de transport basées sur les analyses théoriques sont utiles et le deviendront davantage à mesure que des données additionnelles sont disponibles. La précision dans l'estimation de la quantité de sédiments augmente si l'on couvre une plus longue période.

Dans un sens large, on peut appeler sédiment tout matériau fragmenté qui est transporté, suspendu dans ou déposé par l'eau, l'air et le vent. Dans ce mémoire, nous nous limitons au transport des sédiments par l'eau dans un segment de la rivière Nam Ngum au Laos.

Avant de donner un bref aperçu des données sédimentologiques du segment étudié de la Nam Ngum, il est indispensable d'exposer quelques caractéristiques des matériaux de ce segment.

3.1 Caractéristiques des matériaux

La dimension d'une particule est définie par son diamètre apparent mesuré au tamis pour les particules de diamètre supérieur à 0.1 mm. Jusqu'à 4 μ environ, le diamètre est mesuré au microscope ou évalué par la formule de Stokes au moyen de la vitesse de sédimentation (diamètre de sédimentation).

Selon le classement le plus connu de l'American Society for Testing and Material (ASTM, 1999), la majorité des matériaux du segment étudié de la Nam Ngum sont des sables, des limons et de l'argile. Ces matériaux sont définis en dimension par leur courbe granulométrique. Une telle courbe est montrée à la figure 3.1.

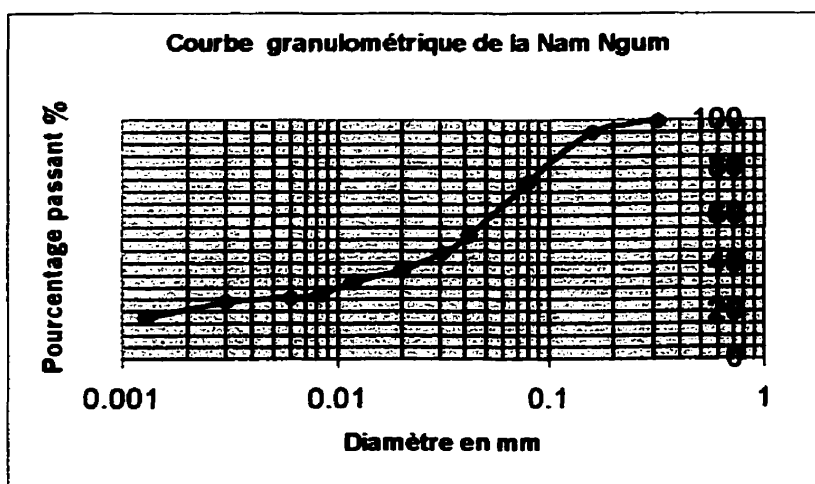


Figure 3.1 Courbe granulométrique des matériaux de la Nam Ngum.

D'après les résultats du traitement des échantillons du sol dans le laboratoire Géotechnique du département C.G.M de l'École Polytechnique de Montréal, nous avons trouvé que l'angle de repos des matériaux du segment étudié est de 31 degrés et l'indice de plasticité I_p de ces matériaux est de 18%.

3.2 Concentration en sédiments

Pour déterminer la concentration en sédiments dans le segment étudié de la Nam Ngum, nous utilisons des données de débits solides mesurés à Tha Lat (en amont) et à Tha Ngone (au milieu) du segment choisi. En se basant sur la théorie de la mesure du transport des sédiments dans les canaux, la mesure a été faite à Tha Lat pour la période 1987- 1989 et 1987-1988 à Tha Ngone.

La charge solide transportée au-delà d'un endroit donné le long de la Nam Ngum est composée d'une charge de ruissellement, d'une charge solide en suspension et d'un charriage de fond. La charge de ruissellement comprend des particules très fines ou colloïdales qui se déposent très lentement même dans les eaux tranquilles. Ce type de matériau est présent en très faible proportion dans les matériaux du lit d'écoulement. L'écoulement turbulent normal dans le cours d'eau a une très grande capacité de transport de la charge de ruissellement. La quantité de charge de ruissellement transportée est donc fonction seulement du débit liquide qui parvient au cours d'eau.

Quelquefois, nous groupons ensemble la charge solide en suspension et le charriage du fond, et nous les appelons le charriage de fond des matériaux. Nous pouvons cependant définir la charge solide en suspension comme les sédiments qui ne séjournent en aucun temps sur le lit du cours d'eau. Nous définissons alors le charriage de fond comme celui qui se déplace par roulement, glissement ou saltation le long du lit du cours d'eau. L'importance du charriage de fond des matériaux dépend des conditions de l'écoulement, puisque les matériaux du lit constituent une source d'alimentation

adéquate pour maintenir le transport des sédiments au maximum selon la capacité du cours d'eau. Ces trois processus différents de transport des sédiments peuvent influencer la précision des mesures du transport des sédiments. Essentiellement, les particules sédimentaires se déplacent à la même vitesse que l'écoulement. En mesurant la concentration des sédiments et le débit de l'eau, nous obtenons le taux de transport. Nous utilisons en outre des courbes de tarage des débits de sédiments versus débits d'eau pour estimer la quantité des sédiments transportée dans ce cours d'eau.

Pour calculer la concentration en sédiments dans le segment étudié, nous utilisons l'équation générale, pour le transport solide total, suivante :

$$C = \frac{Q_s}{Q_l} \quad (3.1)$$

Où C = concentration moyenne de sédiments en volume dans la section;

Q_s = débit solide total et

Q_l = débit liquide en m³/s.

En général, on sait que la concentration de sédiments est proportionnelle au débit liquide parvenant au cours d'eau, c'est-à-dire :

$$C = kQ_l \quad (3.2)$$

Où k = coefficient proportionnel.

La substitution de l'équation (3.2) dans (3.1), permet d'obtenir l'équation suivante :

$$\frac{Q_s}{Q_l} = kQ_l \quad (3.3)$$

Après intégration pour le temps t , l'équation (3.1) devient :

$$\int_0^{365} \frac{Q_s}{Q_l} dt = \int_0^{365} C dt = 365 C$$

$$\int_0^{365} k Q_l dt = 365 C \rightarrow k \int_0^{365} Q_l dt = 365 C \Leftrightarrow k = \frac{365 C}{\int_0^{365} Q_l dt}; \quad (3.4)$$

ou' $\int_0^{365} Q_l dt = \text{volume liquide annuel qui parvient au site}$

Pour calculer le coefficient k nous utilisons les données des débits liquides et débits solides observés à Tha Lat (amont) et à Tha Ngone (milieu) du segment étudié pour la période 1987-1989.

- À Tha Lat : $Q_s = 2975$ tonnes/jour, $Q_l = 612$ m³/s (débit liquide moyen annuel de 15 ans), (MRC,1989) et $Q_l = 487$ m³/s (débit liquide moyen annuel 1987), (MRC,1987).

$$C = \frac{Q_s}{Q_l} \frac{10^4}{864} = \frac{2975 * 10^4}{612 * 864} = 56 \text{ mg/l}$$

$$k = \frac{365 * 56}{365 * 487} = 0.115 \text{ mg.s/l/m}^3$$

Où 864 est le coefficient de conversion (1d = 86400 s; 1 tonne/d = 10⁹ mg/86400 s ; 1 m³/s = 10³ l/s).

- À Tha Ngone : $Q_s = 2180$ tonnes/jour, $Q_l = 680$ m³/s (débit liquide moyen annuel de 25 ans), (MRC,1988) et $Q_l = 470$ m³/s (débit liquide moyen annuel 1987), (MRC,1987).

$$C = \frac{Q_s}{Q_l} \frac{10^4}{864} = \frac{2180 \cdot 10^4}{680 \cdot 864} = 38 \text{ mg/l}$$

$$k = \frac{365 \cdot 38}{365 \cdot 470} = 0.0822 \text{ mg.s/l/m}^3$$

Une fois que le coefficient k est connu, nous calculons les valeurs de la concentration en sédiments à Tha Lat et à Tha Ngone en multipliant les débits liquides journaliers du mois d'août 1987 par k . La figure 3.2 montre la courbe de la concentration en sédiments en fonction du débit liquide à Tha Lat et à Tha Ngone, en août 1987. Nous avons choisi des données des débits liquides du mois d'août 1987, parce que ils sont les plus forts débits pour la période 1987-1989.

Pour la période 1987-1989, selon la figure 3.2 a) et b) nous trouvons que la concentration moyenne des sédiments à Tha Lat et à Tha Ngone est respectivement de 52 mg/l et 39 mg/l. Cette dernière est trouvée en utilisant le débit liquide moyen $Q_l = 591 \text{ m}^3/\text{s}$ à Tha Lat et $Q_l = 479 \text{ m}^3/\text{s}$ à Tha. Ngone.

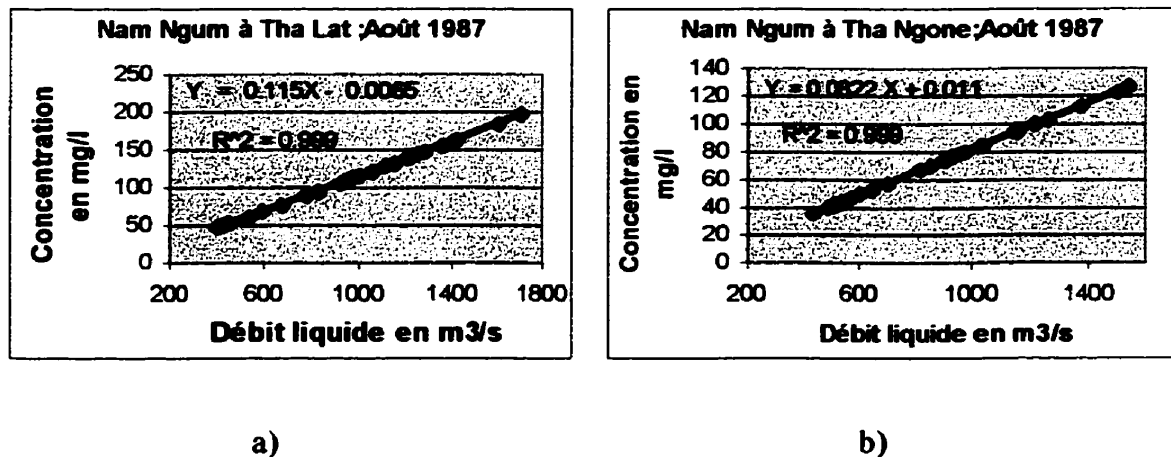


Figure 3.2 Courbe de la concentration en fonction du débit liquide : a) à Tha Lat; (b) à Tha Ngone; Août 1987.

3.3 Débit solide moyen annuel

Les débits solides moyens annuels à Tha Lat et à Tha Ngone de la Nam Ngum ont été estimés par la méthode Flow-Duration, Rating-Curve (FDRC), (Crawfort,1991) Une relation empirique existe également entre le débit solide Q_s et le débit liquide Q_l . Cette relation se présente, souvent, sous la forme :

$$Q_s = aQ_l^b \quad (3.5)$$

Les paramètres a et b ont été estimés par la méthode des moindres carrés de régression des variables Q_s et Q_l .

La figure 3.3 montre la courbe de tarage des débits solides moyens de la Nam Ngum à Tha Lat et à Tha Ngone en août 1987. Les débits solides (en tonnes par jour) ont été estimés en multipliant les débits liquides journaliers du mois d'août 1987 par la concentration des sédiments à Tha Lat et à Tha Ngone, respectivement. Pour les stations de mesure à Tha Lat et à Tha Ngone, nous avons obtenu les relations suivantes :

- À Tha Lat

$$Q_s = 0.00994Q_l^2; \quad (3.6)$$

- À Tha Ngone

$$Q_s = 0.007102Q_l^2; \quad (3.7)$$

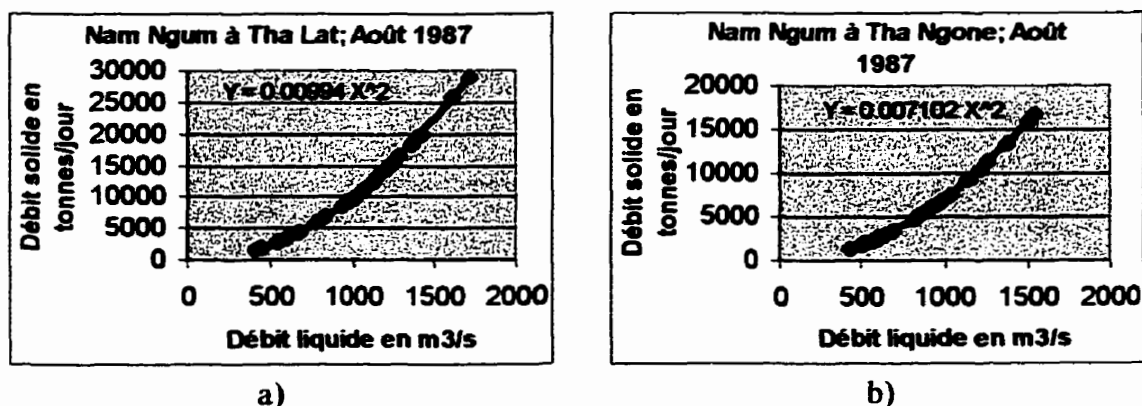


Figure 3.3 Courbe de débit solide en fonction du débit liquide : (a) à Tha Lat ; (b) à Tha Ngone

Ensuite, nous utilisons les courbes de tarage (équations 3.6 et 3.7) pour calculer les débits solides moyens mensuels et annuels pour la période 1987-1989 à Tha Lat et 1987-1988 à Tha Ngone. Les résultats du calcul sont montrés aux tableaux 3.1 et 3.2.

Les sédimentogrammes de la période 1987-1989 à Tha Lat et 1987-1988 à Tha Ngone sont montrés à la figure 3.4 suivante:

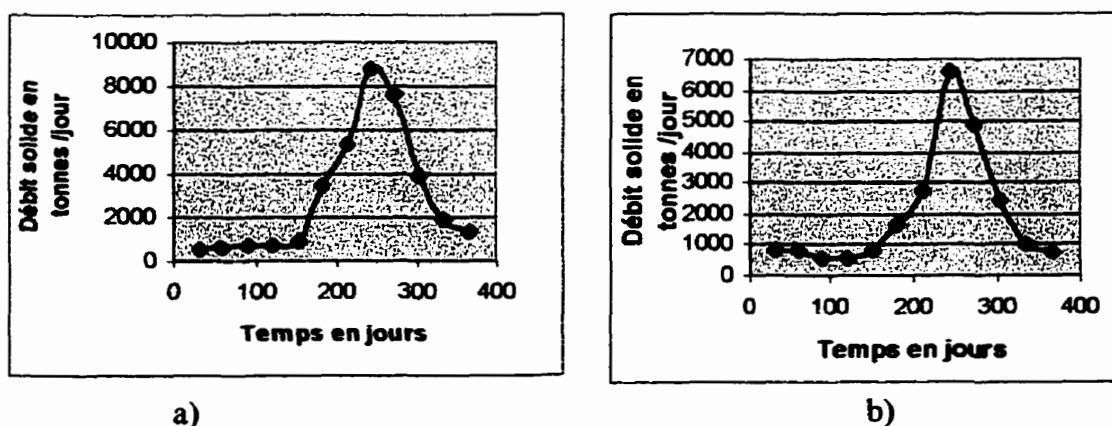
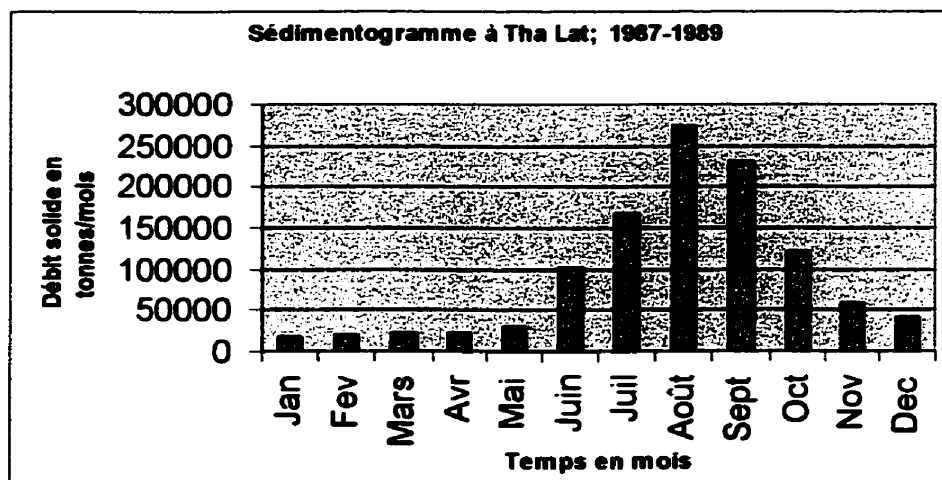
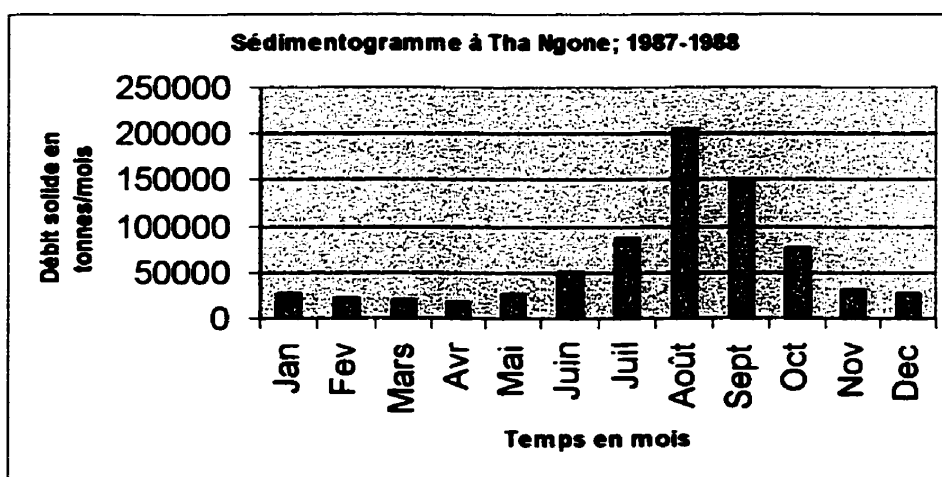


Figure 3.4 Sédimentogramme de la Nam Ngum : (a) à Tha Lat (1987-1989); (b) à Tha Ngone (1987-1988).

La figure 3.5 montre les débits solides moyens mensuels pour la période 1987-1989 à Tha Lat et 1987-1988 à Tha Ngone.



a)



b)

Figure 3.5 Débit solide moyen mensuel de la Nam Ngum: a) à Tha Lat pour la période 1987-1989, b) à Tha Ngone pour la période 1987-1988

Tableau 3.2: Débits solides moyens mensuels et annuels pour la période 1987-1988 à Tha Ngone

	1987	1988	1987	1988	Moyen 1987-1988	Moyen 1987-1988
	Q_l m ³ /s	Q_l m ³ /s	Q_s tonne/d	Q_s tonne/d	Q_s tonne/d	Q_s tonne/mois
Jan	376	315	1004	705	854	26478
Fev	359	314	915	700	808	22611
Mars	331	241	778	412	595	18449
Avr	328	247	764	433	599	17955
Mai	350	335	870	797	833	25832
Juin	492	471	1719	1575	1647	49405
Juil	472	748	1582	3972	2777	86091
Août	832	1080	4915	8281	6598	204542
Sept	815	845	4716	5070	4893	146784
Oct	648	515	2981	1883	2432	75399
Nov	429	314	1307	700	1003	30100
Dec	429	204	1307	295	801	24834
An						728479

Selon les résultats des tableaux 3.1 et 3.2 et de la figure 3.5, nous avons remarqué que le débit solide moyen mensuel le plus grand est celui du mois d'août.

D'après la figure 3.4 a) et b) et les tableaux 3.1 et 3.2 nous avons trouvé que le débit solide moyen est respectivement de 3010 tonnes/jour et 2000 tonnes/jour (le débit solide mesuré à Tha Lat et Tha Ngone est respectivement de 2975 tonnes/jour et 2180 tonnes/jour), c'est-à-dire la concentration en sédiments est calculée par la formule (3.2) est valide.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET ANALYSE

À l'échelle de temps géologique, toute rivière travaille à s'inciser progressivement dans sa vallée pour tendre ultimement vers le niveau marin moyen. Le taux d'incision verticale d'une rivière dépend de l'énergie hydraulique dissipée par son régime de crue (lui-même fonction de la pente de la vallée et du débit y transitant). Ce taux dépend aussi de la résistance à l'incision de certains matériaux, particulièrement le roc qui localement peut affleurer au lit, ainsi que du temps nécessaire pour évacuer tous les débris provenant de l'amont.

Dans ce chapitre nous exposons d'abord l'évolution du lit du bief Tha lat – Pak Ngum de la Nam Ngum pour la situation existante. Ensuite, nous abordons la même question en supposant qu'un barrage est situé en amont du segment étudié. Finalement, nous montrons comment le lit de ce segment va évoluer s'il devait y avoir une forte déforestation dans le bassin de la Nam Ngum.

Pour les trois cas d'étude mentionnés, nous simulons de l'évolution sédimentaire dans le segment étudié en utilisant le modèle hydraulique GSTARS 2.0. Cette simulation est effectuée pour des débits liquides réels à Tha Lat de la Nam Ngum de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans. Le débit liquide maximal de ces récurrences est respectivement 2039 m³/s, 3150 m³/s, 3618 m³/s et 4526 m³/s. Ces débits maximaux ont été déterminés au chapitre II. Aussi, nous utilisons des données de débits solides calculés par la formule (3.6) au chapitre III. Ainsi, dans le processus de simulation de l'évolution sédimentaire du segment étudié, nous appliquons des coefficients de rugosité de Manning n réglés par le modèle HEC-RAS au chapitre II. La figure 4.1 suivante montre l'hydrogramme des débits liquides de la Nam Ngum à Tha Lat (amont) du segment étudié pour des crues

réelles de récurrences mentionnées ci-dessus, considéré pendant 35 jours pour permettre une stabilisation de 5 jours et une simulation effective de 30 jours.

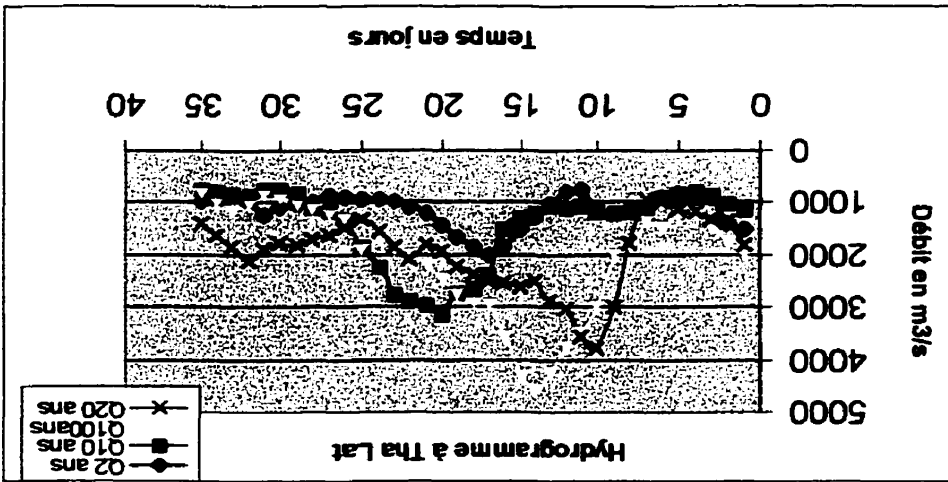
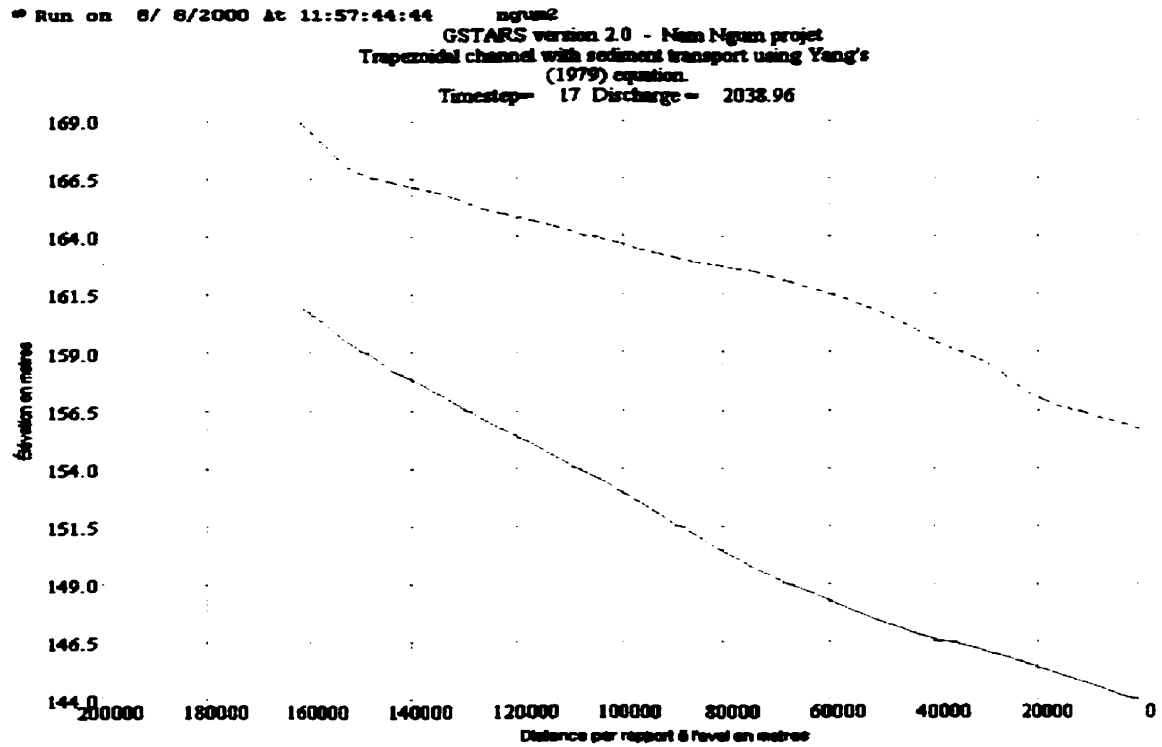
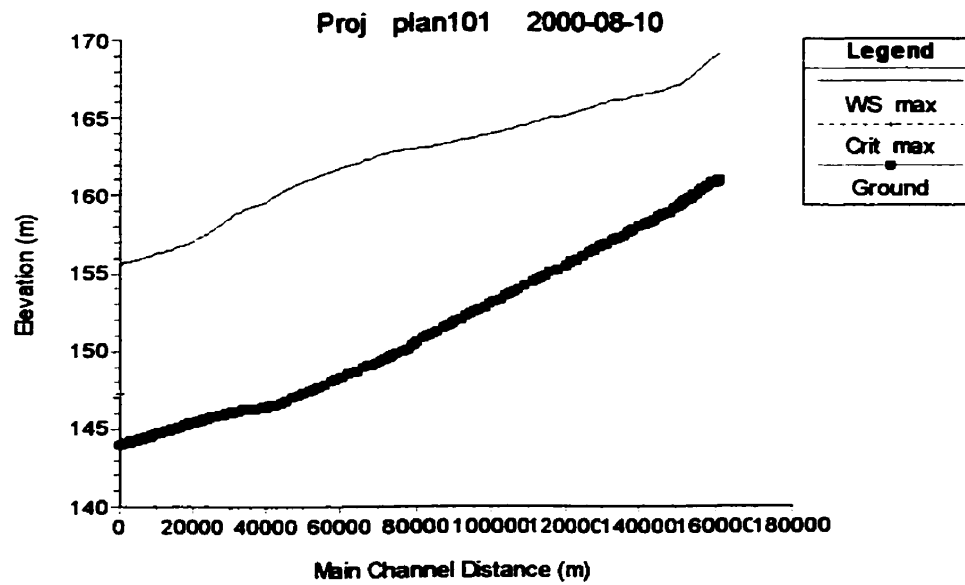


Figure 4.1 Hydrogramme de la Nam Ngum à Tha Lat

Nous confirmons la validité hydraulique de notre simulation de l'évolution du lit du segment Tha Lat-Pak Ngun de la Nam Ngum par la comparaison de la ligne d'eau dans ce segment obtenue en utilisant deux modèles hydrauliques différents : le premier est GSTARS 2.0 et le deuxième est HEC-RAS. D'après les résultats de simulation de deux modèles utilisés, nous avons trouvé que la ligne d'eau dans le segment étudié est presque la même, c'est-à-dire que les conditions sont bien valides. La figure ci-dessous montre la ligne d'eau du bief Tha Lat-Pak Ngun de la Nam Ngum pour des débits liquides réels de récurrence de 2 ans.



a)



b)

Figure 4.2 Comparaison la ligne d'eau du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 2 ans; a) par le modèle GSTARS 2.0; b) par le modèle HEC-RAS.

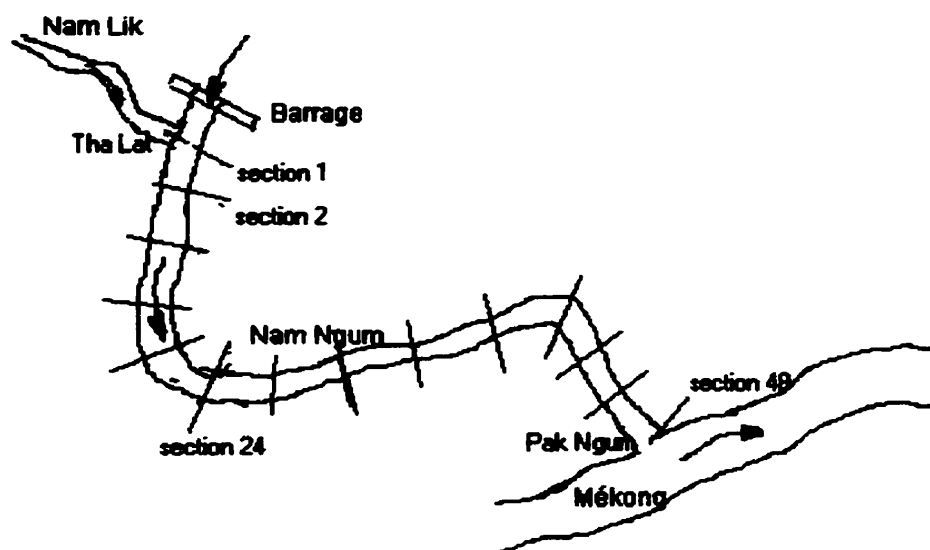


Figure 4.3 Schéma de simulation du tronçon Tha Lat- Pak Ngum

4.1 Situation existante

Dans la procédure de simulation de l'évolution sédimentaire, nous divisons le segment Tha Lat-Pak Ngum de la Nam Ngum en 48 sections par le schéma de figure 4.3.

L'utilisation du modèle de calcul hydraulique GSTARS 2.0 a montré les tendances générales de l'évolution du lit du bief Tha Lat – Pak Ngum de la Nam Ngum. L'évolution du lit du segment étudié a été simulée pour des débits liquides de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans à l'aide du modèle GSTARS 2.0 en utilisant l'équation de Yang 1979. Selon les résultats obtenus nous trouvons que l'évolution actuelle de fond du segment étudié est caractérisée par une érosion des cinq premières sections en amont et de quelques sections en aval et par une déposition des sédiments en amont et au milieu. Cette déposition est assez importante, son épaisseur peut atteindre de 2.5 cm à 6.3 cm (récurrence de 2 ans) et de 3.5 cm à 23.8 cm (récurrence de 100 ans), après 35 jours de simulation. Ces dernières sont importantes en amont (entre les sections 6 et 10) et souvent infimes au milieu (sections 24 et 25). Dans le secteur médian (entre les sections

11 et 23) et le tronçon en aval (entre les sections 40 et 48), le lit du segment étudié évolue très peu. Le tronçon entre les sections 26 et 39 est caractérisé par une érosion faible.

Le premier tronçon en amont (sections 1 et 5) est caractérisé par un soudain renforcement de la pente d'énergie (voir figure 2.3), donc dans ce tronçon il y a une incision verticale assez forte de son lit (érosion). La figure 4.4 illustre de cette explication.

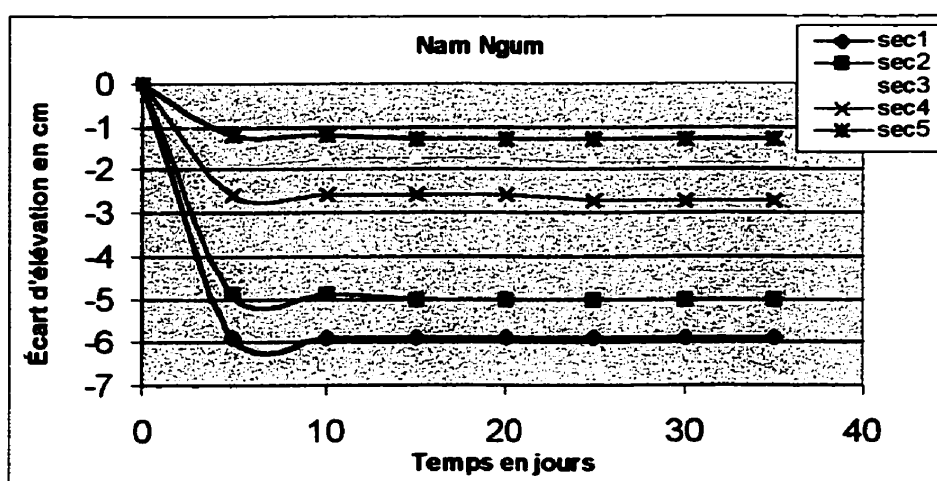


Figure 4.4 Courbe d'incision du lit des sections en amont pour la récurrence de 2 ans.

Les figures 4.5 et 4.6 montrent les accumulations des dépôts et l'évolution du lit du bief Tha Lat – Pak Ngum de la Nam Ngum pour la récurrence de 2 ans. Elles représentent la situation courante. La figure 4.5 montre que l'accumulation des dépôts dans le lit du segment étudié est en fonction du temps.

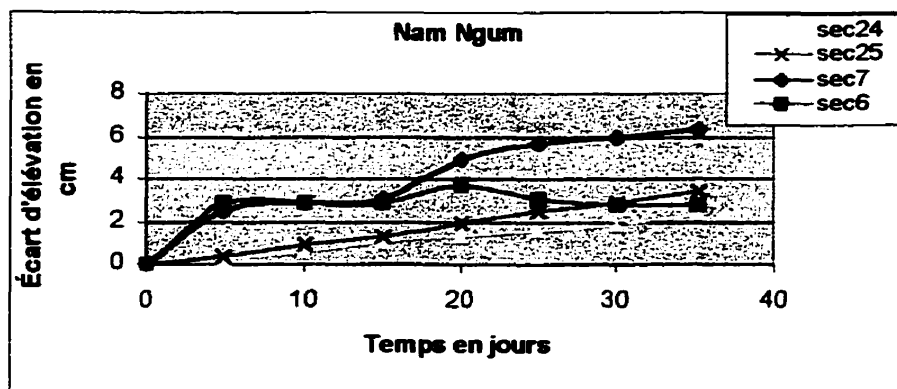


Figure 4.5 Courbe d'évolution du lit des sections 6, 7, 24 et 25 du bief Tha Lat – Pak Ngum pour la récurrence de 2 ans.

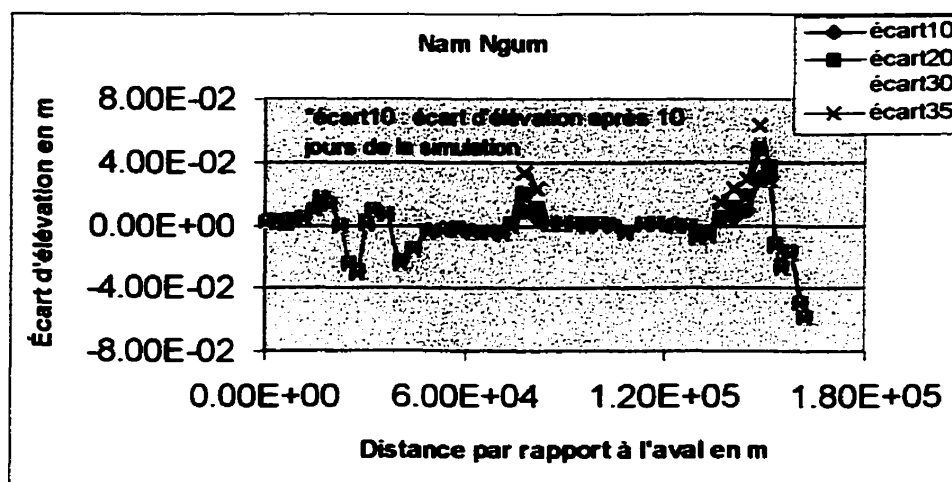


Figure 4.6 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat–Pak Ngum pour la récurrence de 2 ans.

D'après la figure 4.6, il est intéressant de noter que dans le processus de l'évolution du lit du bief étudié il y a deux bassins de décantation formés, l'un en amont (entre les sections 6 et 10) et l'autre au milieu (de section 24 à 25). Ce phénomène est facile à expliquer parce que dans ce tronçon (entre sections 6 et 10) la largeur est très grande, particulièrement dans la section 7 où la largeur atteint 255 mètres. En ce qui concerne

les sections 24 et 25, c'est la pente de fond qui est faible et la largeur de ces sections est plutôt vaste.

Le graphique suivant montre la capacité de transport solide en tonnes par jour de première section en amont et de la section 24 au milieu. Nous constatons que la quantité de sédiments transportés est logiquement fonction des débits liquides.

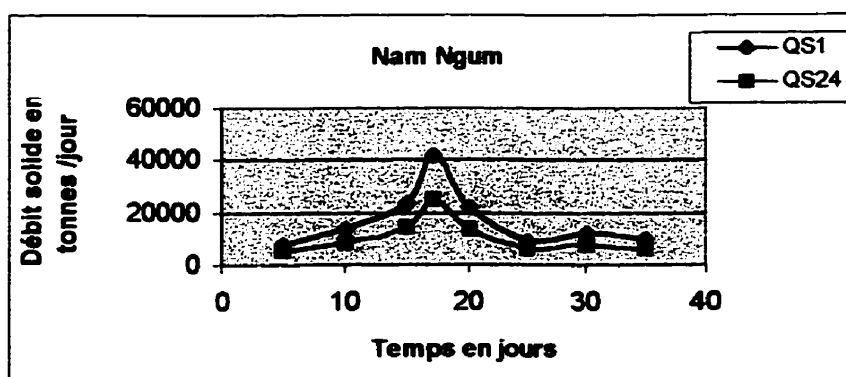


Figure 4.7 Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la récurrence de 2 ans.

La quantité des sédiments qui vont être déposés (ou érodés) dans un tronçon ΔQ_{sb} dépend de la différence entre le débit solide des stations en amont $Q_{sb}(i)$ et aval $Q_{sb}(i+1)$: $\Delta Q_{sb}(i) = Q_{sb}(i) - Q_{sb}(i+1)$. À titre d'exemple, la figure 4.8 présente la courbe de dépôt des sédiments dans le tronçon entre sections 1 et 24 pour la récurrence de 2 ans.

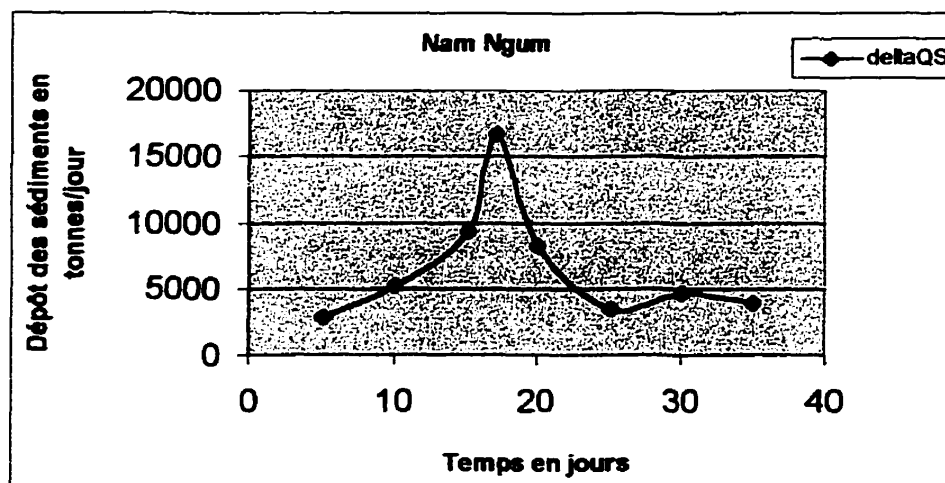


Figure 4.8 Courbe de dépôt des sédiments dans le tronçon entre les sections 1 et 24 pour la récurrence de 2 ans.

D'après les résultats obtenus qui ont été simulés avec les récurrences de 10, 20 et 100 ans, nous arrivons à la conclusion suivante : le lit du segment étudié de la Nam Ngum, en général, y maintient une évolution similaire à celle de la récurrence de 2 ans. La quantité des dépôts de sédiments et la profondeur d'érosion sont plus grandes que celles de 2 ans, parce que des débits liquides et les apports solides sont plus grands.

Les graphiques suivants montrent l'évolution du lit des sections 6, 7, 24 et 25 du segment étudié de la Nam Ngum pour les récurrences respectives de 10, 20 et 100 ans.

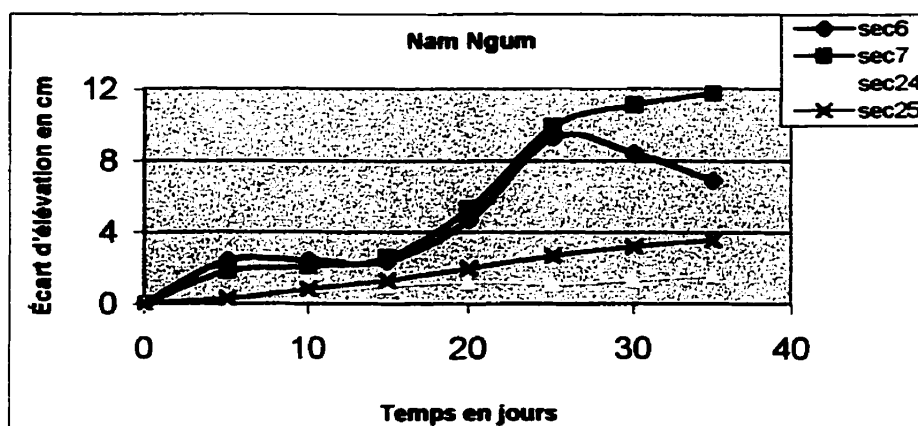


Figure 4.9 Courbe d'évolution du lit des sections 6, 7, 24 et 25 du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 10 ans.

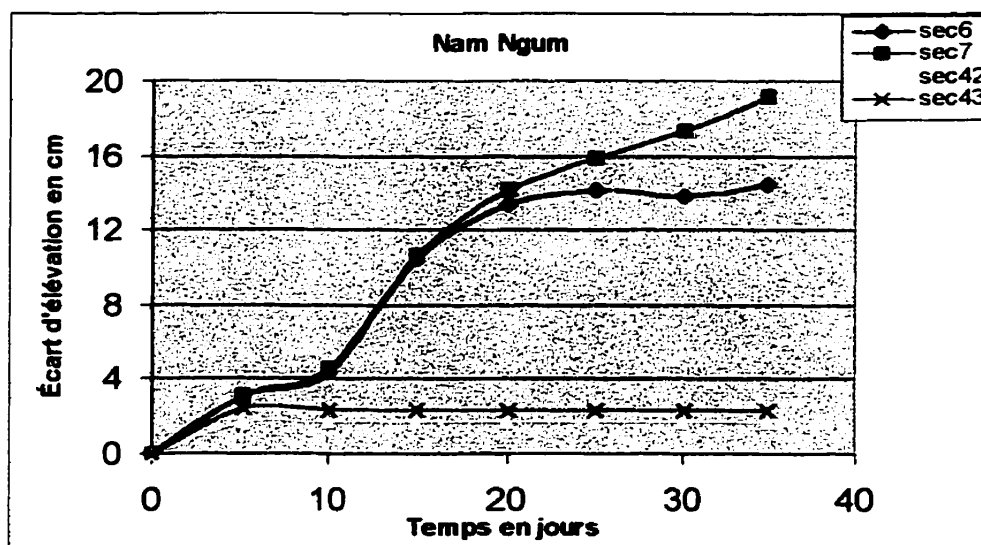


Figure 4.10 Courbe d'évolution du lit des sections 6, 7, 24 et 25 du bief Tha Lat – Pak Ngum pour la récurrence de 20 ans.

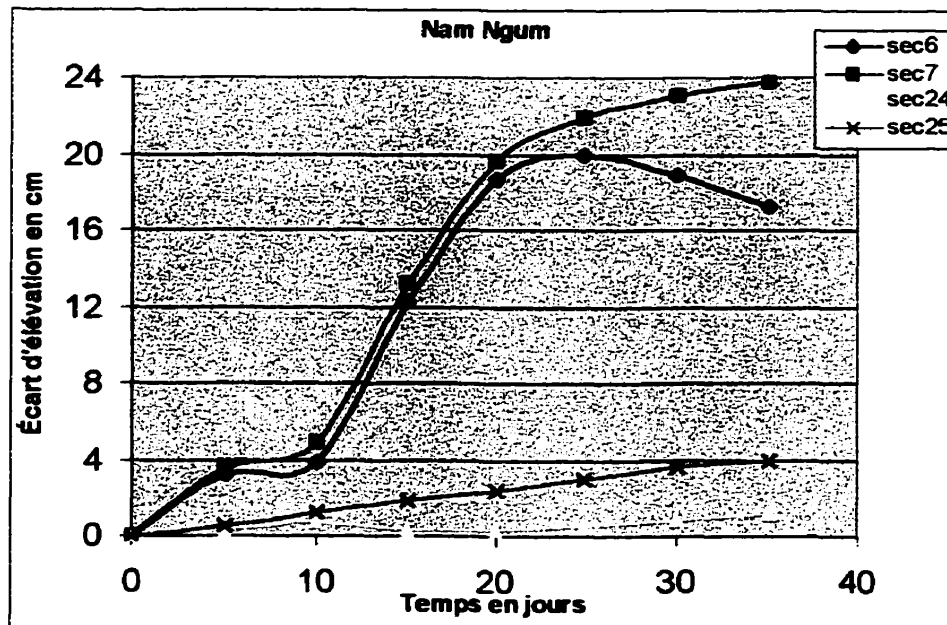


Figure 4.11 Courbe d'évolution du lit des sections 6, 7, 24 et 25 du bief Tha Lat – Pak Ngum pour la récurrence de 100 ans.

Comme nous avons mentionné ci-dessus, le lit de premier tronçon en amont est caractérisé par une incision verticale, donc les figures ci-après illustrent cette évolution pour les récurrences de 10, 20 et 100 ans, respectivement. Dans ce tronçon amont, l'incision est terminée après quelques jours et pourrait correspondre à une adaptation du lit à la crue. La profondeur maximale d'incision atteint de 6 cm (récurrence de 2 ans) à 7.3 cm (récurrence de 100 ans).

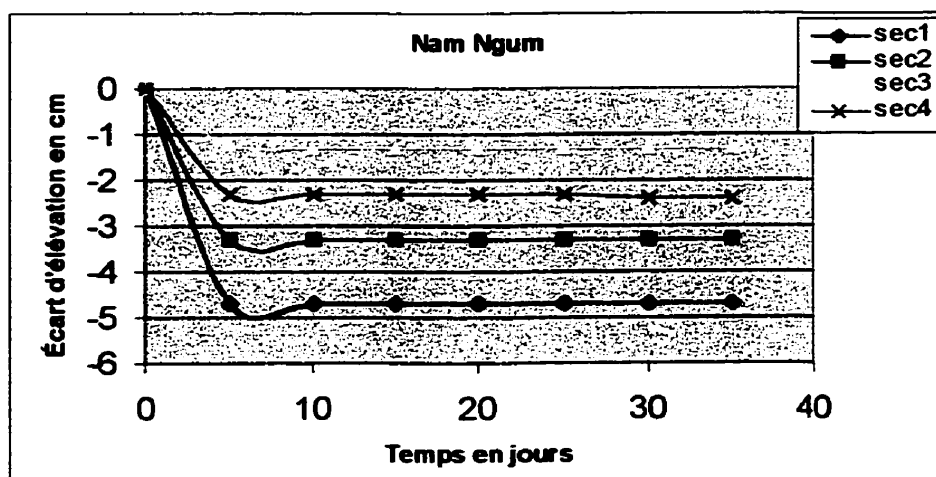


Figure 4.12 Courbe d'incision du lit de quatre sections en amont pour la récurrence de 10 ans.

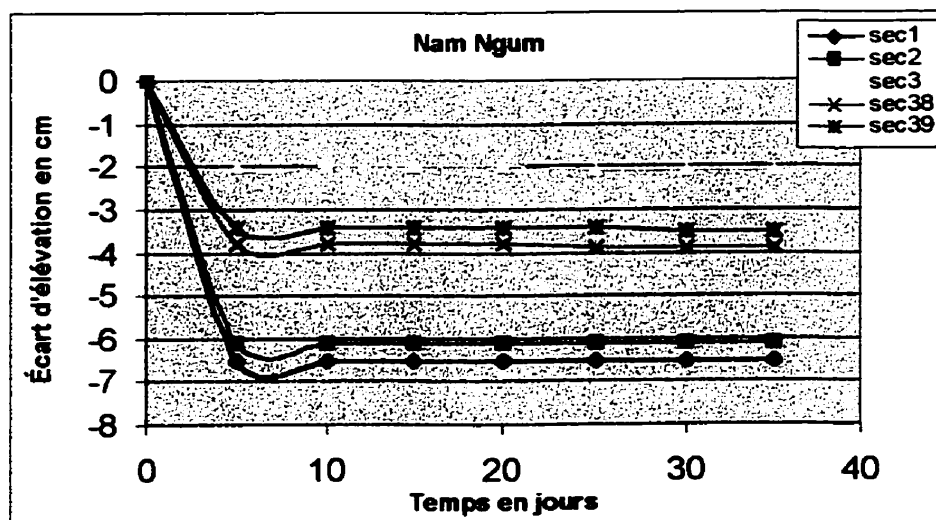


Figure 4.13 Courbe d'incision du lit de quatre sections en amont pour la récurrence de 20 ans.

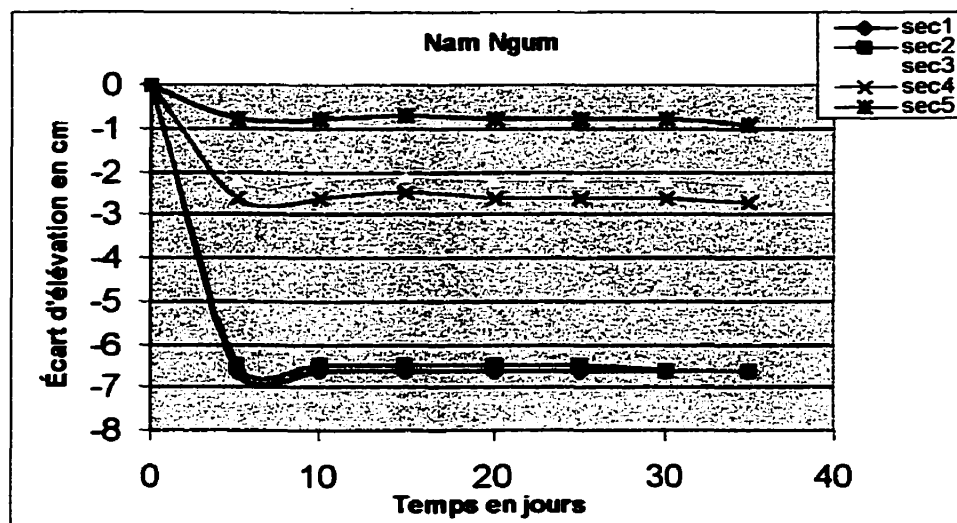


Figure 4.14 Courbe d'incision du lit des sections en amont pour la récurrence de 100 ans.

Les figures suivantes montrent l'évolution du lit le long du bief Tha Lat-Pak Ngum de la Nam Ngum pour les récurrences de 10, 20 et 100 ans. Elles indiquent les deux zones activités passées la zone d'adaptation.

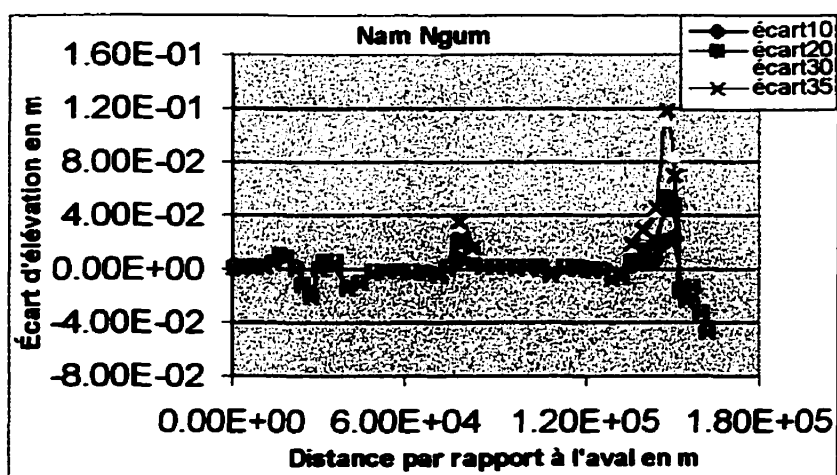


Figure 4.15 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 10 ans. Voir la légende de figure 4.6

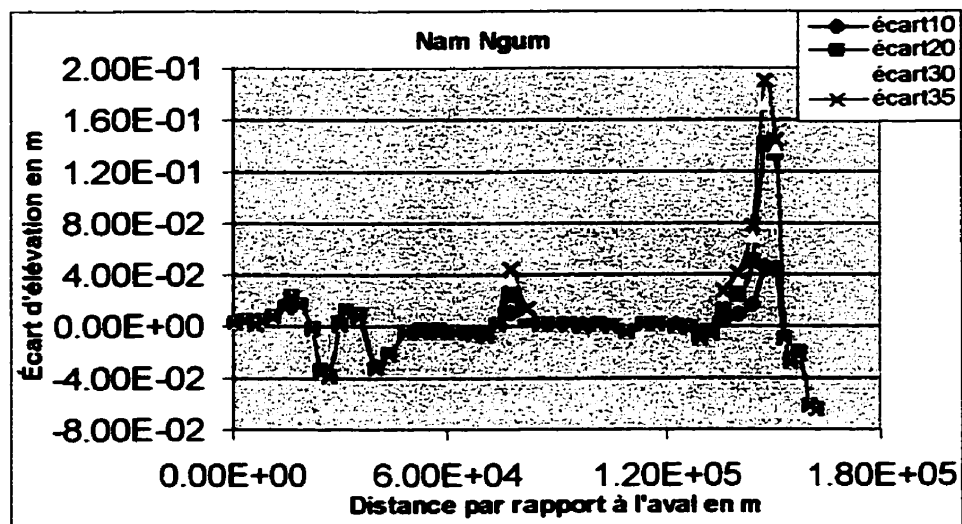


Figure 4.16 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 20 ans. Voir la légende de figure 4.6.

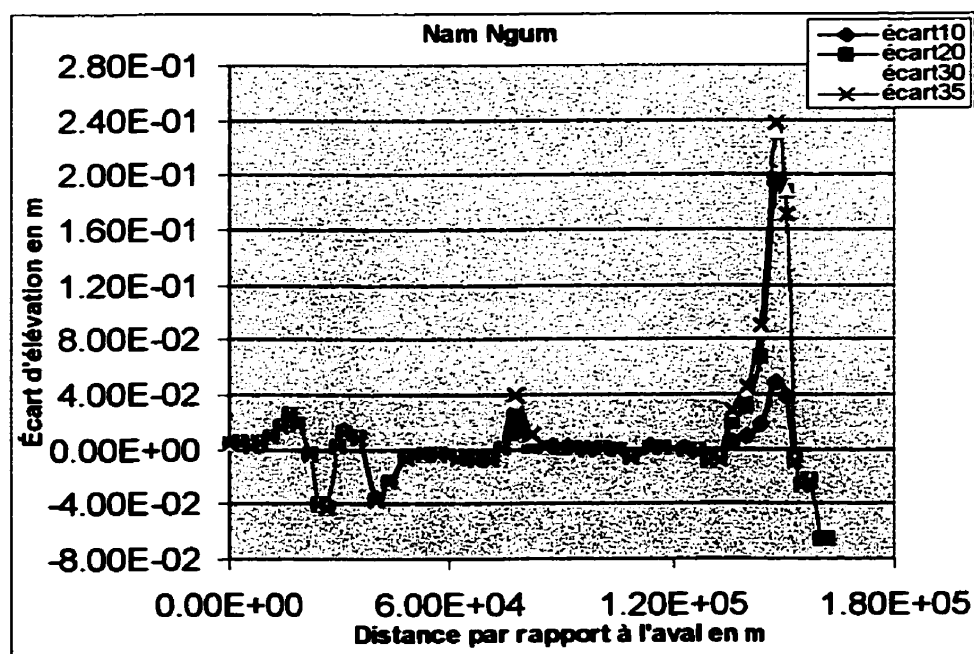


Figure 4.17 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 100 ans. Voir la légende de figure 4.6

Les graphiques suivants montrent la capacité de transport des sédiments en tonnes par jour de la première section en amont et de la section 24 au milieu du segment étudié pour les récurrences respectives de 10, 20 et 100 ans. Nous constatons que le débit solide total maximal en tonnes par jour est 98987, 144540, 208726 à la première section et 58446, 85295, 125077 à la section 24. Elles indiquent une tendance au dépôt dans le tronçon en aval.

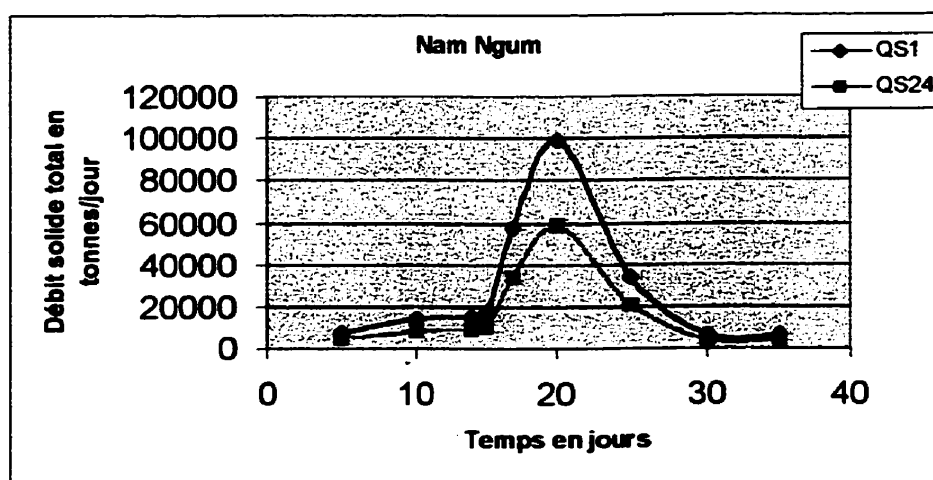


Figure 4.18 Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la récurrence de 10 ans

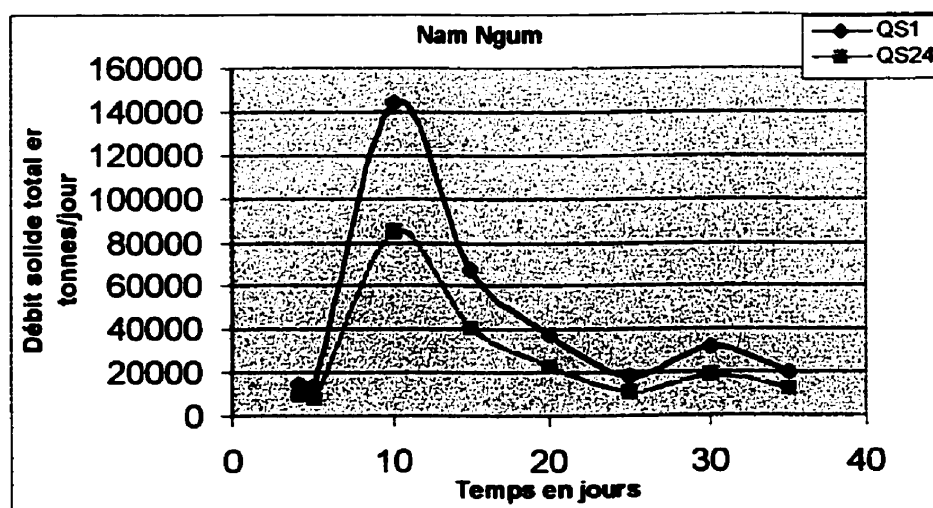


Figure 4.19 Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la récurrence de 20 ans.

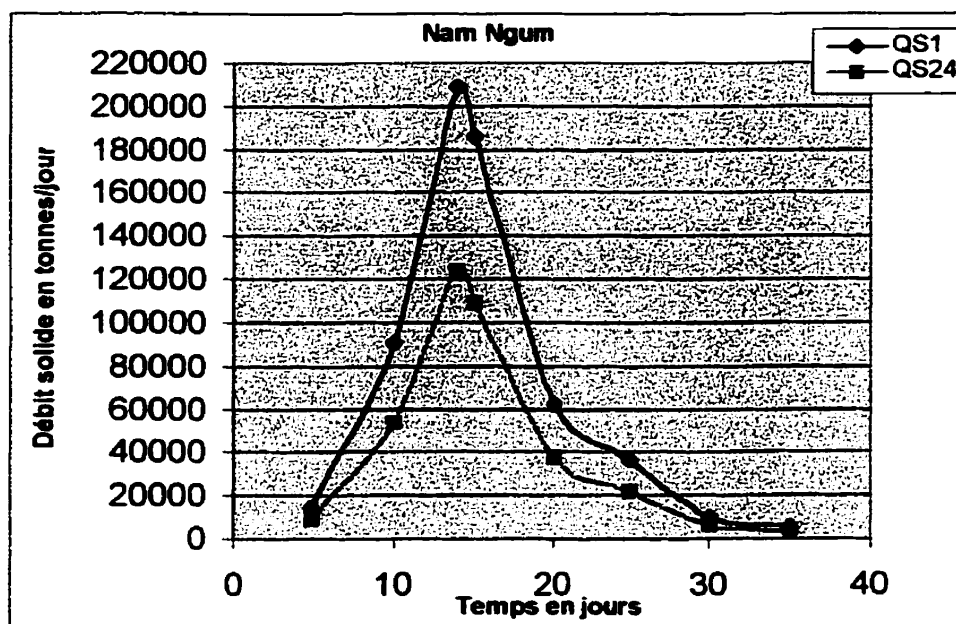


Figure 4.20 Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la récurrence de 100 ans.

Les dépôts des sédiments en tonnes par jour dans le tronçon entre les sections 1 et 24 du segment étudié pour les récurrences de 10, 20 et 100 ans seront présentés par la figure 4.21 ci-dessous :

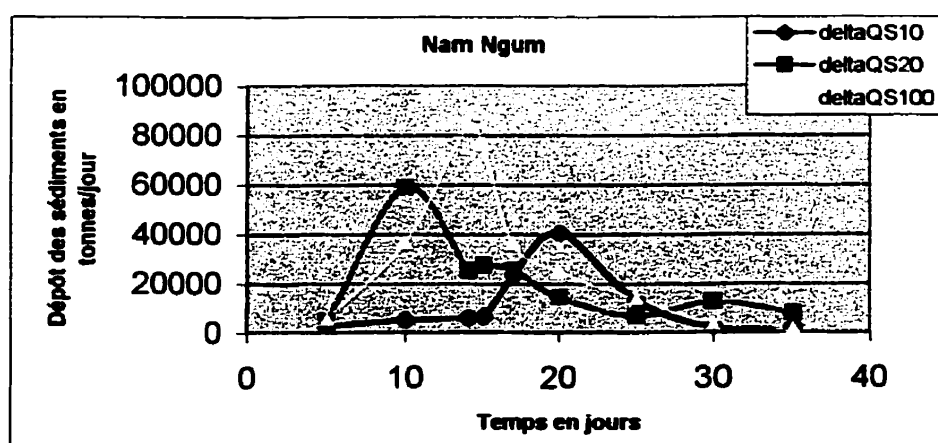


Figure 4.21 Courbe de dépôt des sédiments dans le tronçon entre les sections 1 et 24 pour les récurrences de 10, 20 et 100 ans.

Selon les figures 4.8 et 4.21, nous remarquons que le dépôt maximal en tonnes par jour est respectivement 16703, 40541, 59245 et 83649 pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans. Ce dépôt croît avec la sévérité de la crue. Les analyses suivantes servent à vérifier si ce comportement est essentiellement lié à l'apport sédimentaire.

4.2 Ajout d'un barrage sur la rivière

La principale raison de construire un barrage est de stocker de l'eau et de la contrôler. On peut construire des barrages, pour différents objectifs, tels que : la maîtrise des crues, l'amélioration de la navigation, la production d'électricité ou la fourniture d'eau domestique, industrielle ou agricole, etc.

La construction d'un barrage et la création d'un grand réservoir ont des conséquences très importantes comme les risques de pertes de vies humaines, les dommages matériels et les environnements, etc. En général, la construction d'un barrage sur la rivière présente à la fois des avantages et des inconvénients et l'effort à faire est de limiter ces derniers comme la maîtrise de la déstabilisation du lit.

Dans ce paragraphe nous exposons l'évolution du lit du bief Tha Lat – Pak Ngum de la Nam Ngum lorsqu'on ajoute d'un barrage en amont du segment étudié.

Si un barrage était construit en amont du segment étudié de la Nam Ngum, la grande partie des sédiments transportés par les courants d'eau seraient déposés et accumulés dans le réservoir de ce barrage. Pour ce cas, dans le fichier de données du modèle GSTARS 2.0, nous supposons que le débit solide entrant dans la première section en amont du segment étudié est égal à zéro ($Q_S = 0$). En gardant identique des autres données du cas précédent, nous avons étudié le segment choisi de la Nam Ngum pour des débits liquides de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans, en supposant que le réservoir n'était pas en mesure de changer les crues par laminage.

D'après les résultats de la simulation pour des débits liquides de récurrence de 2 ans, nous trouvons que l'évolution du lit du segment étudié, maintient d'une manière générale deux bassins de décantation: l'un en amont (sections 6 et 7) et l'autre au milieu (sections 24 et 25). Nous constatons que dans les dix premiers jours de la simulation, l'adaptation du lit s'y traduit par un dépôt des sédiments; après quoi le lit commence et continue à se creuser. Nous remarquons que l'érosion du fond du lit du segment étudié a tendance à augmenter. Particulièrement, les cinq premières sections en amont et les sections 34, 38 et 39 sont caractérisées par une forte érosion (voir les figures 4.23, 4.30- 4.32).

Les figures suivantes montrent l'évolution du lit du bief Tha Lat – Pak Ngum de la Nam Ngum pour le cas où les débits solides entrant en amont sont nuls. Les dépôts des sédiments dans les sections 6, 7, 24 et 25 pour des débits liquides de récurrence de 2 ans ont été présentés par la figure 4.22. Selon cette figure, l'épaisseur de la couche sédimentaire atteint une valeur de 0.45 cm à 2.8 cm

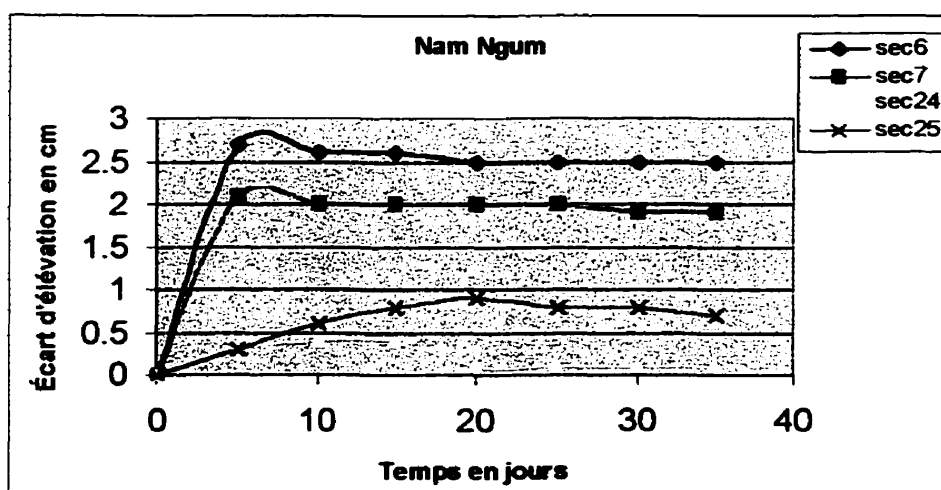


Figure 4.22 Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 24 et 25 pour la récurrence de 2 ans.

La figure 4.23 ci-dessous illustre l'évolution du lit le long du bief Tha Lat – Pak Ngum de la Nam Ngum pour des débits liquides de récurrence de 2 ans.

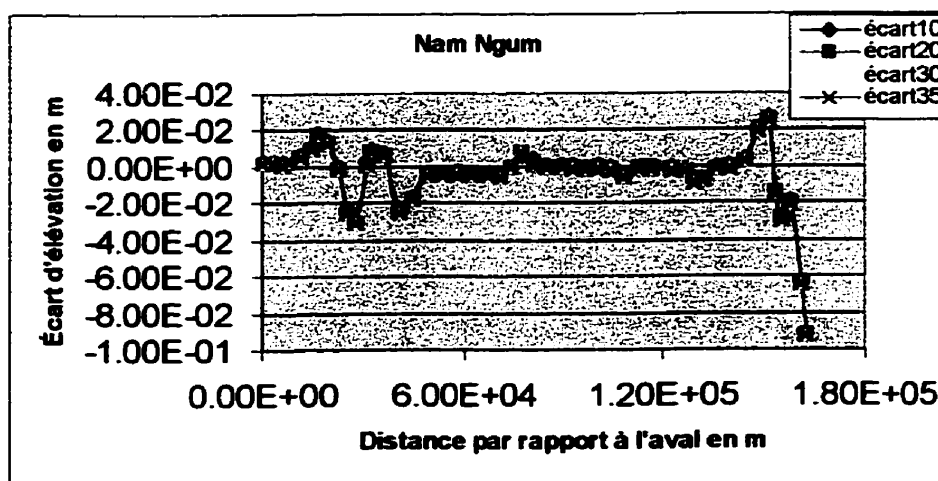


Figure 4.23 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat–Pak Ngum pour la récurrence de 2 ans. Voir la légende de figure 4.6

Comme nous avons cité ci-dessus, dans ce cas l'érosion du fond du lit a une tendance à monter en fonction des débits liquides. La figure suivante montre l'incision pour les cinq premières sections en amont du segment étudié de la Nam Ngum. Nous constatons que l'incision est stable tout de suite après 5 jours de simulation et la profondeur maximale d'incision atteint de 9.8 cm pour la récurrence de 2 ans à 11.4 cm pour la récurrence de 100 ans (voir les figures 4.24 et 4.35).

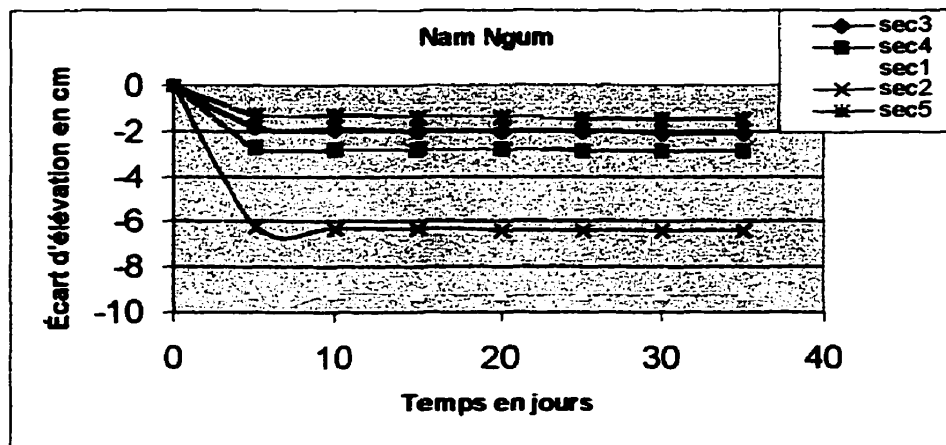


Figure 4.24 Courbe d'incision du lit de cinq premières sections en amont pour la récurrence de 2 ans.

La figure 4.24 ci-dessous montre la charge sédimentaire totale (débit solide total) en tonnes par jour des sections 1 et 24 du segment étudié de la Nam Ngum. Nous trouvons que le débit solide total atteint sa valeur maximum au 17^e jour de simulation et est égale à 1759 tonnes/jour à la première section et 3348 tonnes/jour à la section 24.

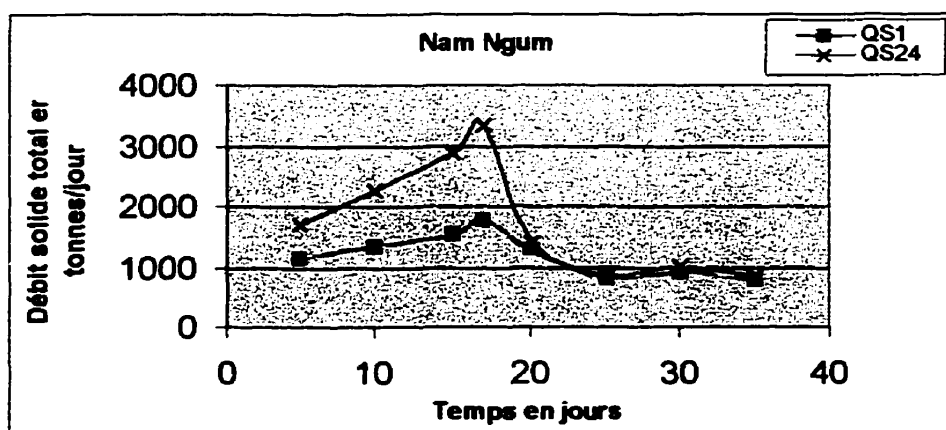


Figure 4.25 Courbe de débit solide des sections 1 et 24 pour la récurrence de 2 ans.

La quantité d'érosion en tonnes par jour dans le tronçon entre la première section en amont et la section 24 au milieu est présentée à la figure ci-après. Selon cette figure, nous constatons que la quantité d'érosion maximale est 1589 tonnes/jour.

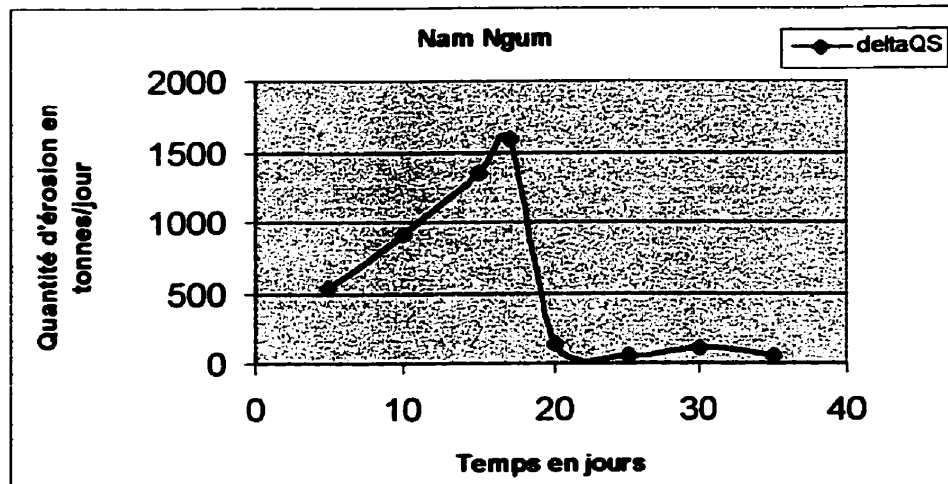


Figure 4.26 Courbe de quantité d'érosion entre les sections 1 et 24 pour la récurrence de 2 ans

En ce qui concerne l'évolution du lit des sections 6, 7, 41 et 42 du segment étudié pour des débits liquides de récurrence de 10, 20 et 100 ans, elle est montrée aux figures suivantes. D'après ces figures, l'épaisseur de la couche sédimentaire dans le fond de la section 6 atteint de 2.3 cm pour la récurrence de 10 ans à 3.2 cm pour la récurrence de 100 ans.

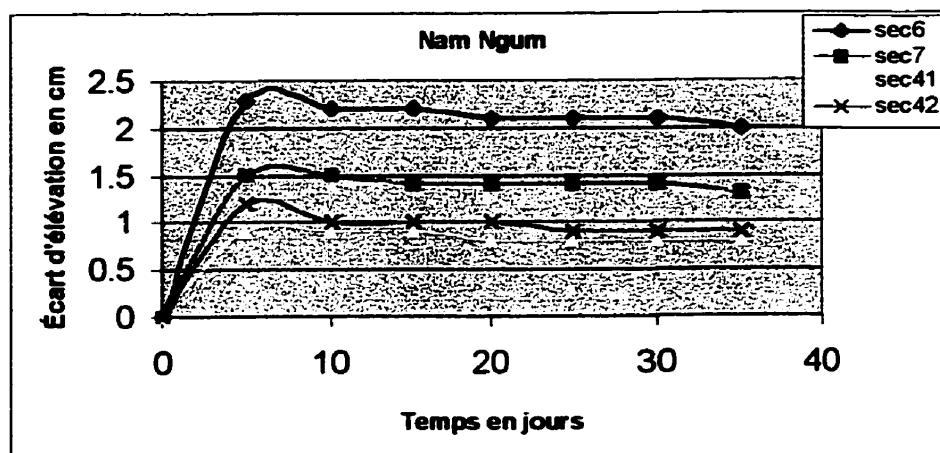


Figure 4.27 Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 41 et 42 pour la récurrence de 10 ans.

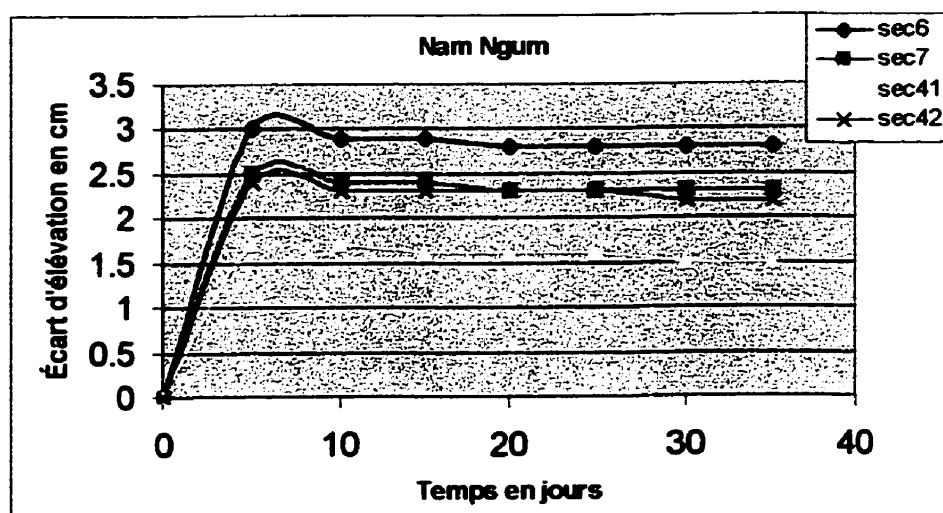


Figure 4.28 Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 41 et 42 pour la récurrence de 20 ans.

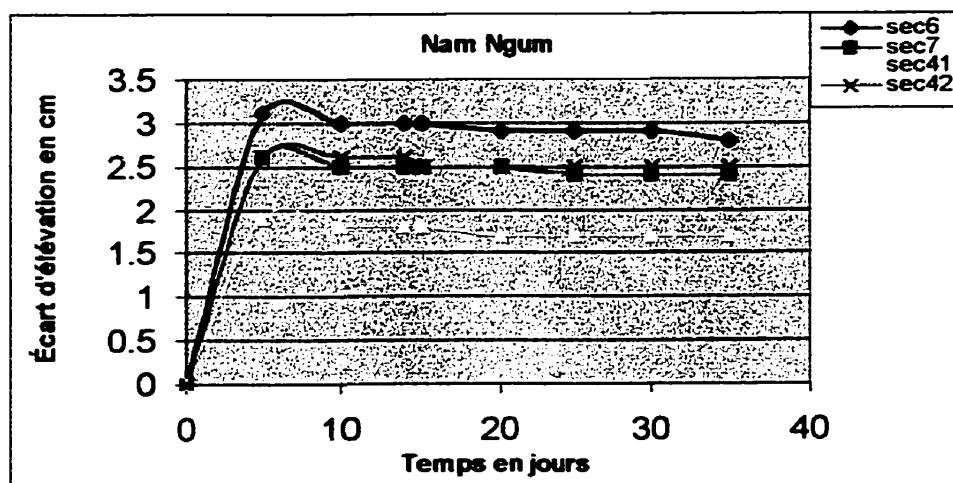


Figure 4.29 Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 41 et 42 pour la récurrence de 100 ans.

Ensuite, les figures ci-après montrent l'évolution du lit le long du segment étudié pour des débits liquides de récurrence de 10, 20 et 100 ans.

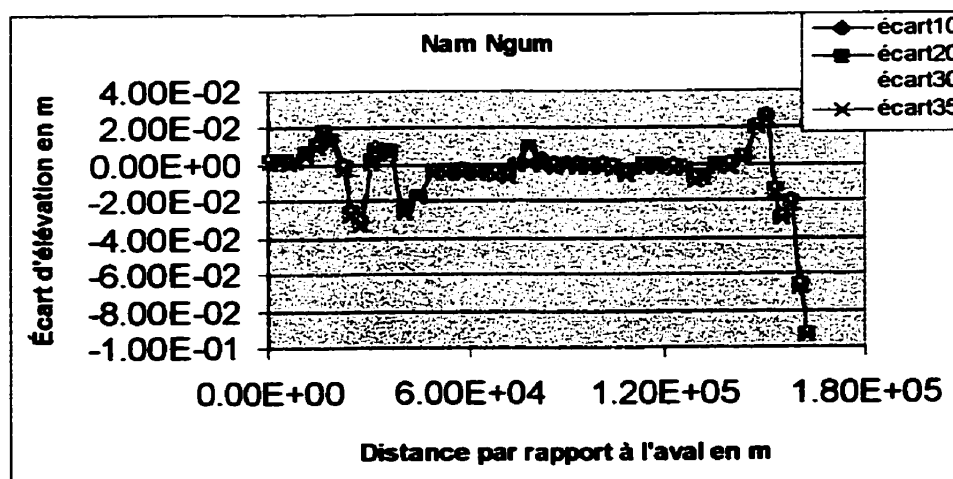


Figure 4.30 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 10 ans. Voir la légende de figure 4.6

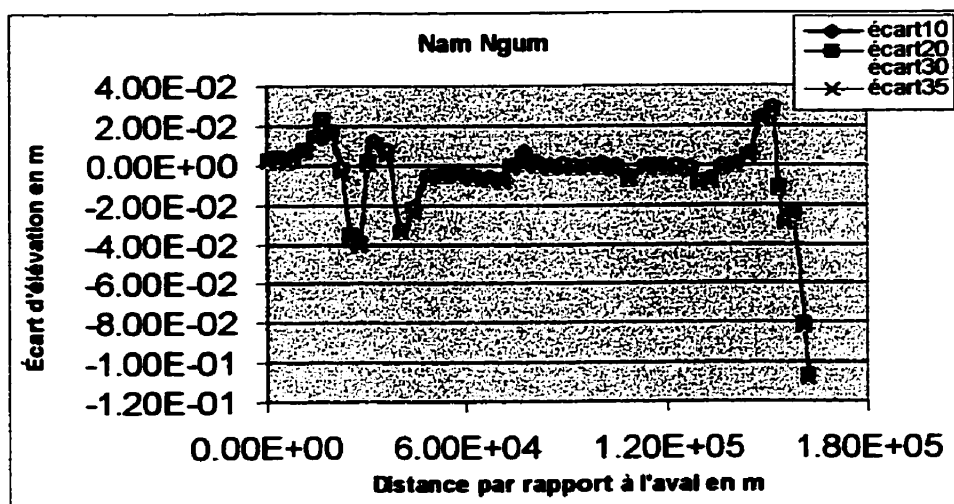


Figure 4.31 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 20 ans. Voir la légende de figure 4.6

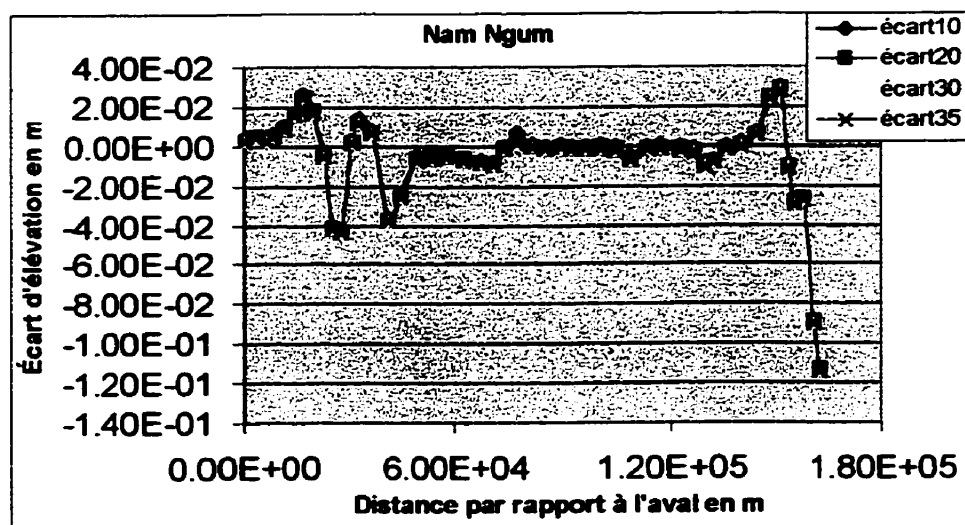


Figure 4.32 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 100 ans. Voir la légende de figure 4.6

Selon les figures 4.30, 4.31 et 4.32 nous constatons que dans le processus de l'évolution du lit du segment étudié il y a un nouveau bassin de décantation en aval (entre les sections 41 et 42) formé.

Le taux d'incision du lit des trois premières sections en amont et des sections 38, 39 pour des débits liquides de récurrence de 10, 20 et 100 ans est présenté par les graphiques ci-dessous. Selon ces figures la profondeur d'incision atteint de 1.5 cm à 12 cm.

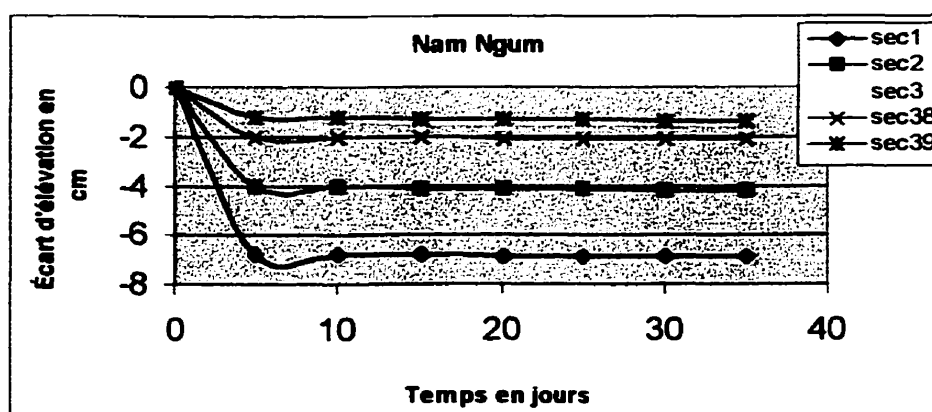


Figure 4.33 Courbe d'incision du lit des trois premières sections en amont et des sections 38 et 39 pour la récurrence de 10 ans

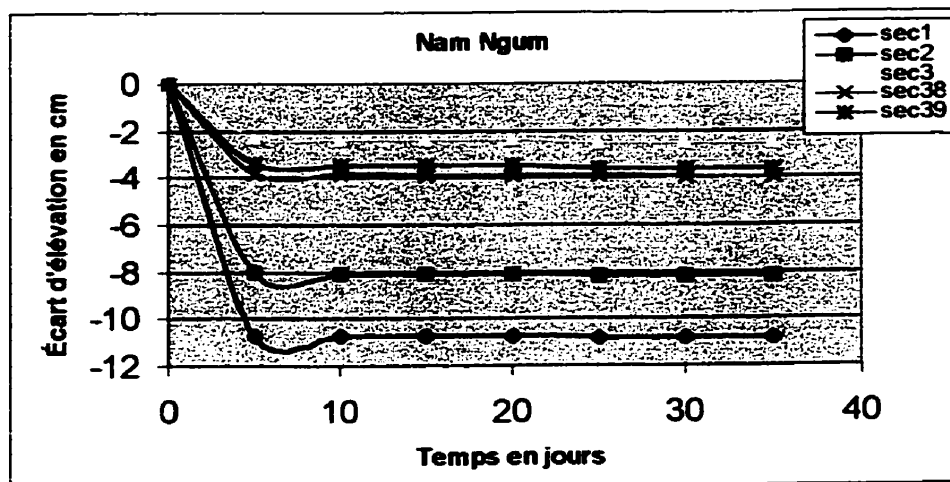


Figure 4.34 Courbe d'incision du lit des trois premières sections en amont et des sections 38 et 39 pour la récurrence de 20 ans

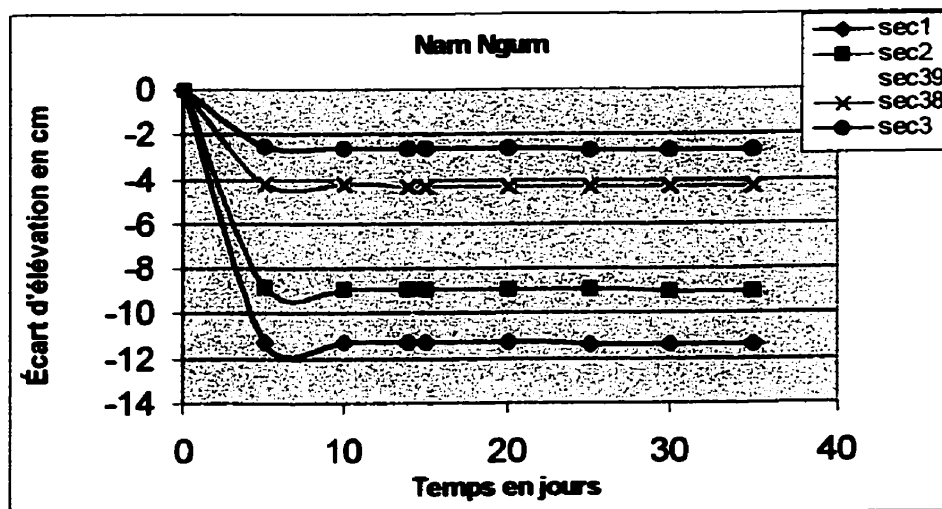


Figure 4.35 Courbe d'incision du lit des sections 1, 2, 3, 38 et 39 pour la récurrence de 100 ans

Ainsi, les graphiques suivants montrent la charge sédimentaire totale en tonnes par jour des sections 1 et 24 du segment étudié pour des débits liquides de récurrence de 10, 20 et 100 ans.

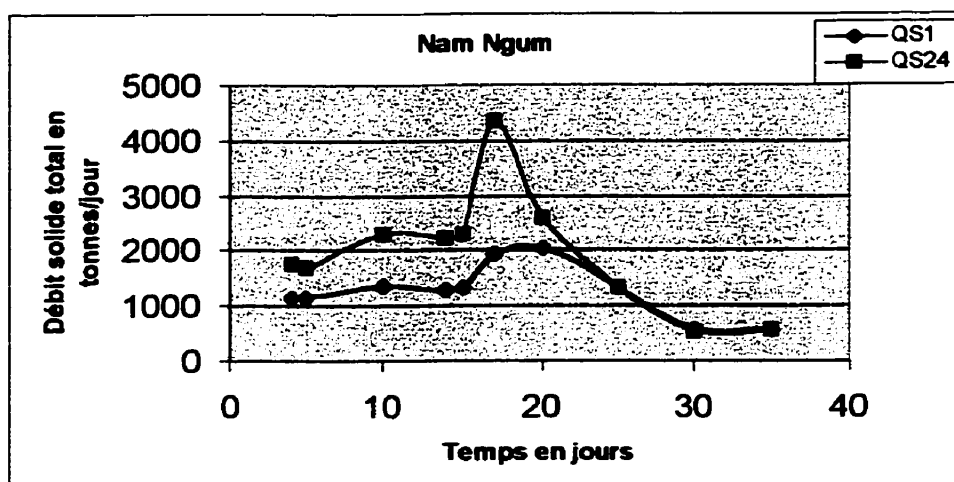


Figure 4.36 Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 10 ans

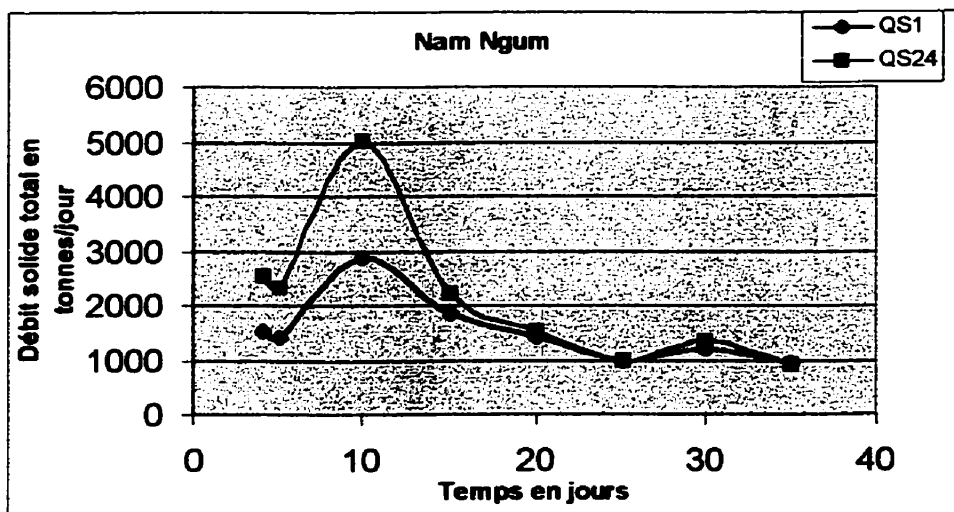


Figure 4.37 Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 20 ans

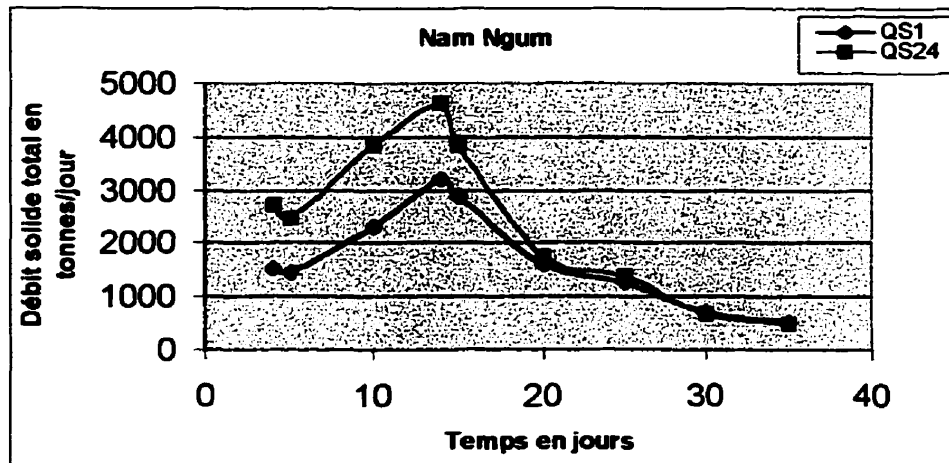


Figure 4.38 Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 100 ans

D'après les figures 4.36, 4.37 et 4.38, le débit solide total maximal est 1944 tonnes/jour et 4356 tonnes/jour (récurrence de 10 ans), 2874 tonnes/jour et 5003 tonnes/jour (récurrence de 20 ans), 3202 tonnes/jour et 4616 tonnes/jour (récurrence de 100 ans) respectivement à la première section et à la section 24.

Enfin, la quantité d'érosion du lit du tronçon entre la première section en amont et la section 24 pour des débits liquides de récurrence de 10, 20 et 100 ans est représentée à la figure 4.39. Nous remarquons que la quantité d'érosion maximale en tonnes par jour est respectivement 2412, 2129 et 1546.

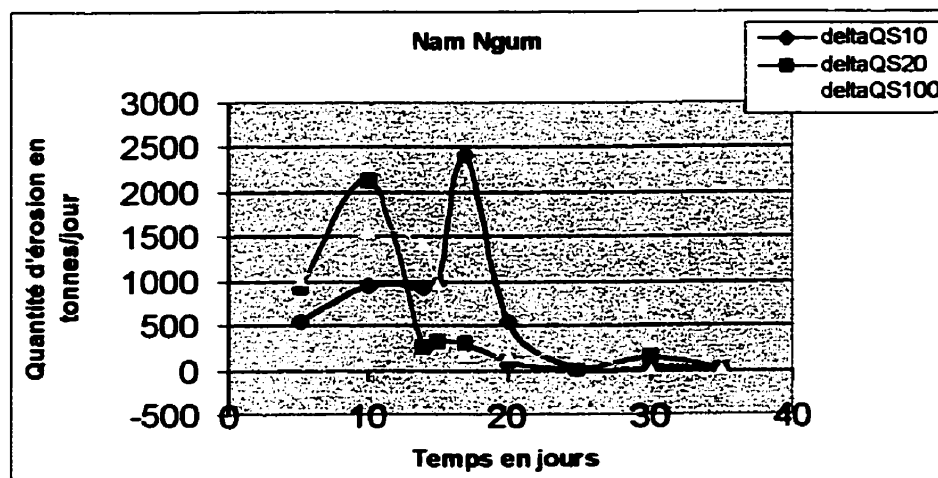


Figure 4.39 Courbe de quantité d'érosion entre les sections 1 et 24 pour les récurrences de 10, 20 et 100 ans

En se basant sur les résultats obtenus par la simulation du modèle GSTARS 2.0 pour des débits liquides de récurrence de 2, 10, 20, et 100 ans, nous arrivons aux conclusions suivantes :

1. La comparaison des figures 4.7 et 4.25 montre bien la diminution des mouvements sédimentaires dans le tronçon étudié.
2. Il en résulte (figures 4.8 et 4.26) une diminution nette des dépôts et un renforcement de l'érosion des premières sections en amont (comparaison des figures 4.4 et 4.24).

Ainsi, lorsqu'un barrage a été établi en amont du segment étudié, nous constatons que:

3. Pour des débits liquides de récurrence de 2 ans, le lit du segment étudié évolue de manière similaire au cas précédent (paragraphe 4.1), c'est-à-dire dans le processus de l'évolution du lit deux bassins de décantation formés: l'un en amont et l'autre au milieu.

4. Pour des débits liquides de récurrence de 10, 20 et 100 ans l'évolution du lit du segment choisi est changée. Dans ces trois derniers cas, l'érosion du lit a une tendance à augmenter partout le long du segment étudié, le bassin de décantation au milieu du tronçon est disparu, un nouveau bassin de décantation formé en aval (entre les sections 40 et 42).
5. Il y a moins de dépôts dans le bassin de décantation en amont du segment étudié (voir les figures 4.30, 4.31 et 4.32).
6. La quantité maximale de l'érosion dans le tronçon entre la première section et la section 24 est respectivement 1589 tonnes/jour, 2412 tonnes/jour, 2129 tonnes/jour et 1546 tonnes/jour pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans (voir les figures 4.26 et 4.39).

4.3 Déforestation

4.3.1 Pourquoi la déforestation ?

L'utilité des forêts et les raisons de les conserver sont connues : cadre de vie, production de bois et de biens divers, stock de carbone et réservoir génétique. Et pourtant elles sont détruites à un rythme qui semble s'accélérer depuis quelques années. Des causes de leur disparition peuvent être liées à des décisions de développement ou d'équipement et à l'organisation sociale et économique.

Les besoins de l'agriculture et de l'élevage sont une des principales raisons de déforestation avec des buts variés.

- L'extension des cultures de rente. Elle correspond à une politique de développement économique pour l'exportation des produits de ces cultures. Elle se traduit par une déforestation complète et définitive de la zone concernée.
- La demande croissante de produits vivriers a provoqué une dégradation progressive de la couverture forestière.

- La migration organisée vers des régions sous-peuplées s'accompagne d'une déforestation, dans ces régions, des terres destinées à l'élevage ou à l'agriculture.
- La migration spontanée de populations peut les conduire à rechercher de nouvelles terres à cultiver, même dans des zones impropres à l'agriculture, par exemple en raison du relief et des risques d'érosion.

Quel est l'impact de l'agriculture de défriche-brûlis sur l'environnement au Laos ? Tout dépend de ce que l'on entend par déforestation. Chaque année, des milliers d'hectares de forêts sont effectivement brûlés par les agriculteurs. La destruction des ressources naturelles a alors conduit à un système de production agricole de cultures de rente. C'est une situation comparable qui prévaut dans la plaine de Vientiane, avec l'aménagement de nouvelles rizières aux dépens de la forêt primaire dans les districts du bassin de la Nam Ngum. Le risque de défriche-brûlis des forêts dans ce bassin est grand et peut créer une forte érosion de surface, entraînant vers les rivières les éléments les plus fertiles. Comment l'érosion de surface influence l'évolution sédimentaire des cours d'eau dans le bassin de la Nam Ngum ? La réponse est donnée dans le paragraphe suivant.

4.3.2 Effet de la déforestation

Dans ce paragraphe nous exposons une prévision d'évolution du lit du tronçon Tha Lat-Pak Ngum de la Nam Ngum en supposant qu'il y a une forte déforestation dans le bassin en amont de cette rivière. Pour ce cas, nous supposons que des débits solides entrants dans le segment étudié sont doubles des débits solides existants. En utilisant le modèle GSTARS 2.0, nous avons simulé l'évolution sédimentaire dans ce segment de la Nam Ngum pour des débits liquides réelles de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans. Les résultats de la simulation sont présentés ci-après.

En général, l'évolution du lit du segment étudié, pour des débits liquides de récurrence donnée, maintient le même rythme que les cas précédents ; c'est-à-dire qu'il y a deux bassins de décantation formés, l'un en amont (entre les section 6 et 10) et l'autre au

milieu (sections 24 et 25). Pour le cas présent, la quantité de dépôt des sédiments dans le fond du lit est grande. Cette dernière peut atteindre une valeur de 14.7 cm (récurrence de 2 ans) à 53.3 cm (récurrence de 100 ans), après 35 jours de la simulation (voir figures 4.40 et 4.43). Dans ce cas, nous trouvons que la partie en érosion du lit du segment étudié est moins importante. Les figures suivantes montrent l'évolution du lit du segment étudié de la Nam Ngum pour le cas où il y aurait une forte déforestation dans son bassin versant.

L'évolution du lit aux sections 6, 7, 24 et 25 du segment étudié pour des débits liquides de récurrence donnée est présentée par les figures ci-dessous. Selon ces figures, l'épaisseur de la couche sédimentaire augmente avec l'augmentation des récurrences étudiées et elle est en fonction du temps. L'épaisseur maximale de la couche sédimentaire, après 35 jours de la simulation, est 14.8 cm, 27.1 cm, 46 cm et 53.3 cm pour les récurrences respectives de 2, 10, 20 et 100 ans.

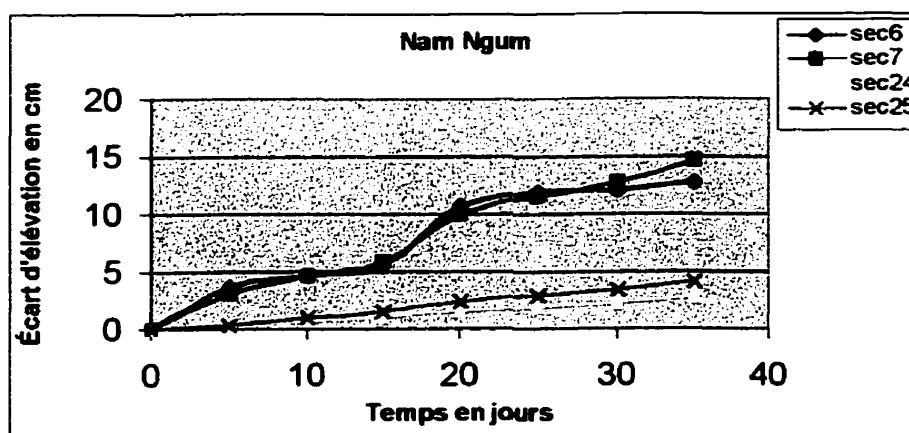


Figure 4.40 Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 24 et 25 pour la récurrence de 2 ans.

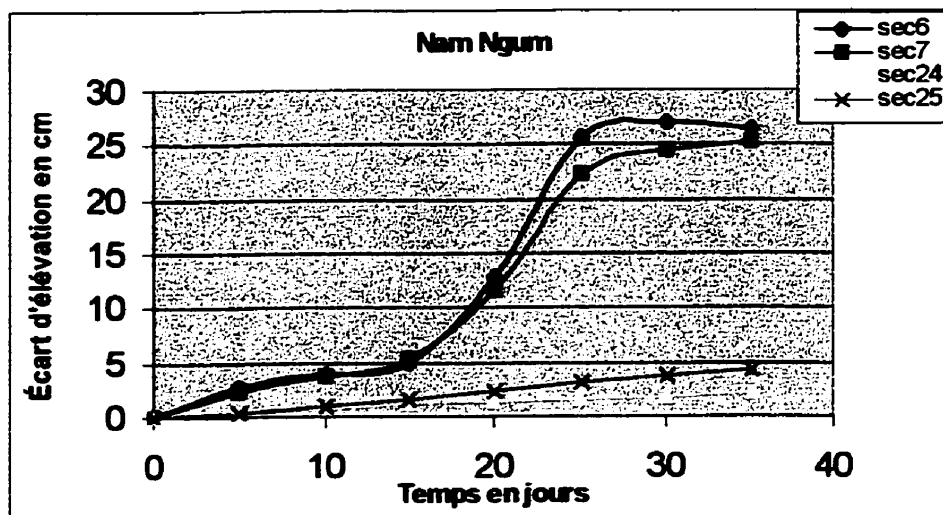


Figure 4.41 Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 24 et 25 pour la récurrence de 10 ans.

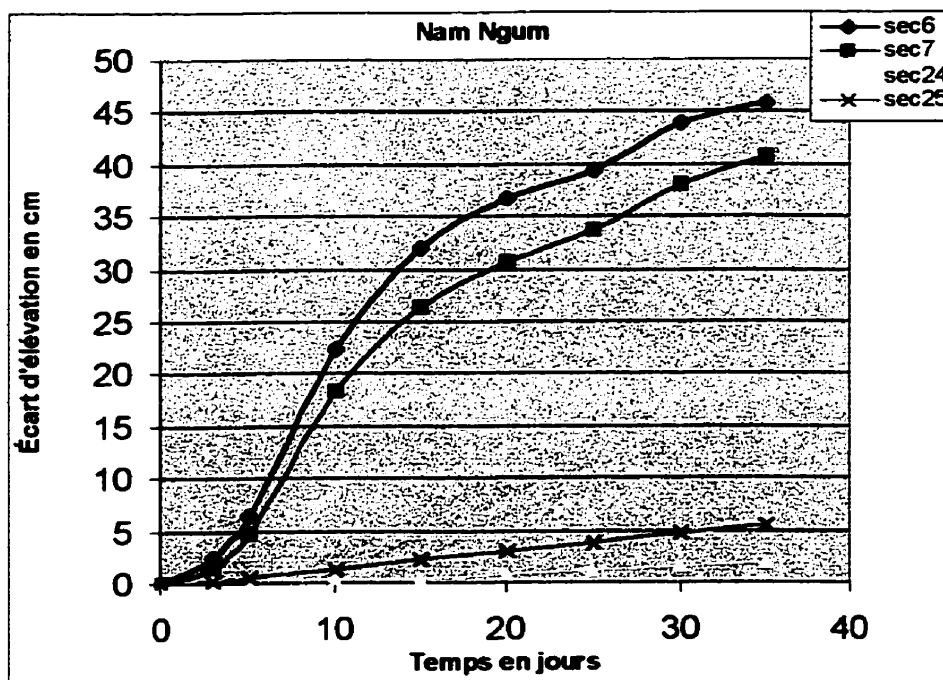


Figure 4.42 Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 8, 24 et 25 pour la récurrence de 20 ans.

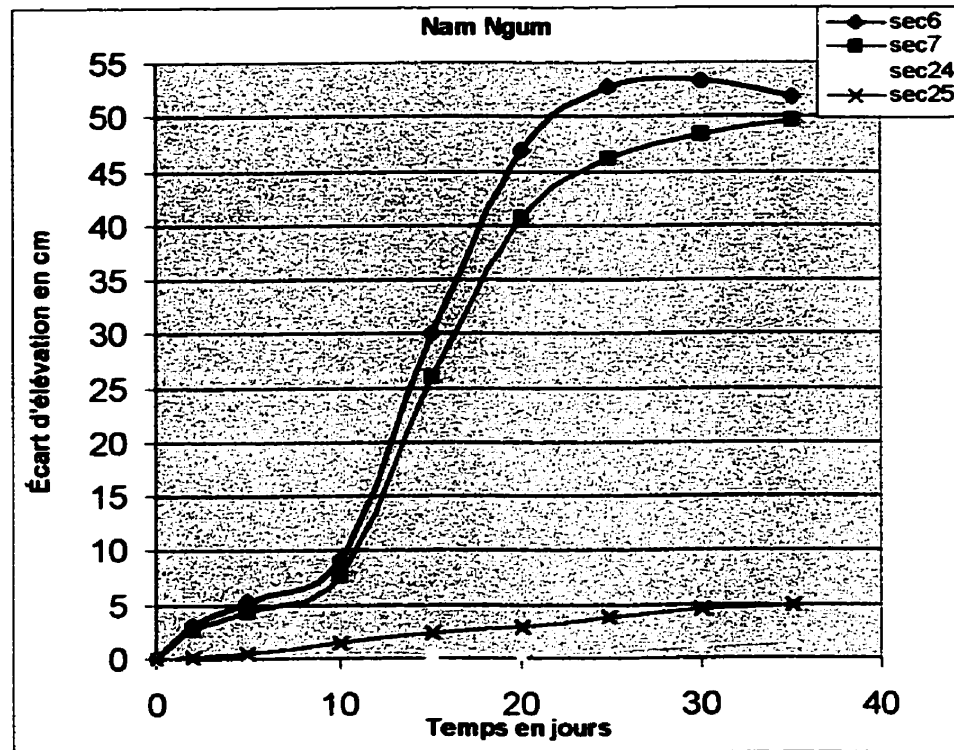


Figure 4.43 Courbe de dépôt des sédiments des sections 6, 7, 24 et 25 pour la récurrence de 100 ans.

Certes, des apports solides entrants sont grands alors que l'érosion du fond du segment étudié est petite. Nous trouvons que la profondeur d'incision dans la première section en amont atteint de 3 cm pour la récurrence de 2 ans à 4 cm pour la récurrence de 100 ans. Pour le cas étudié, nous constatons que l'érosion du fond du segment étudié est stable tout de suite après 5 jours de la simulation. Nous interprétons cette incision par les figures suivantes.

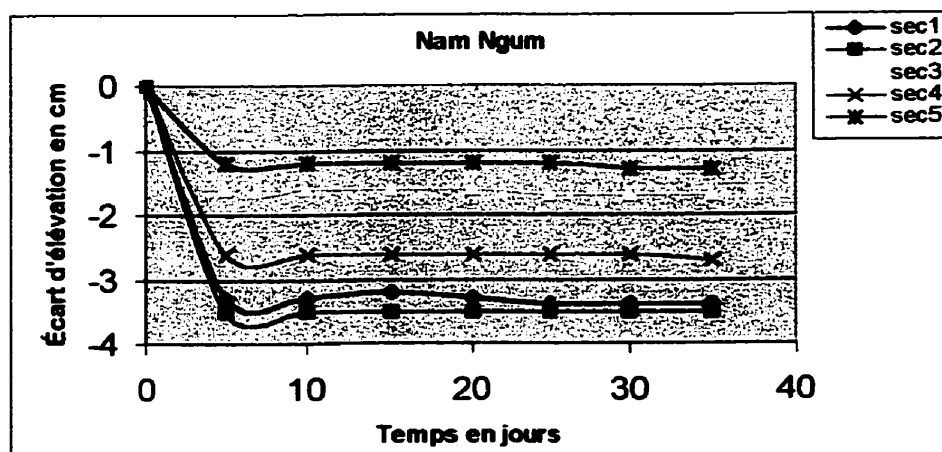


Figure 4.44 Courbe d'incision du lit des cinq premières section en amont pour la récurrence de 2 ans.

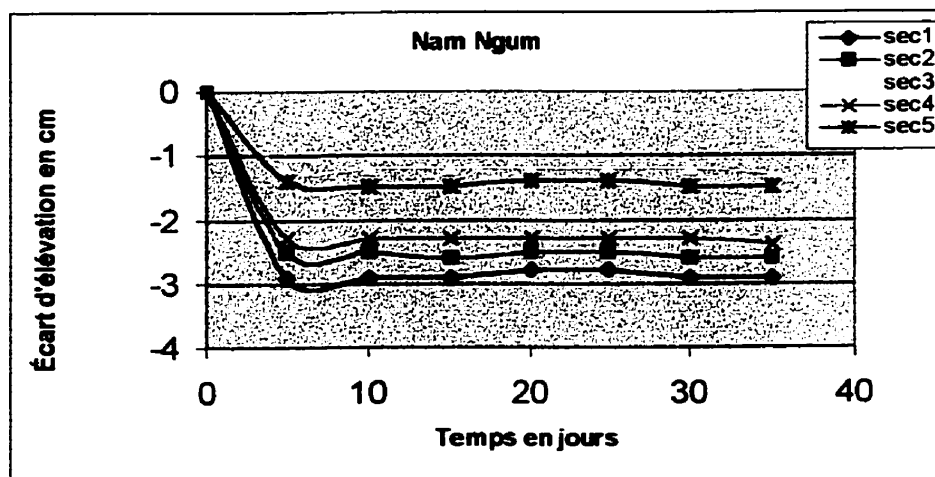


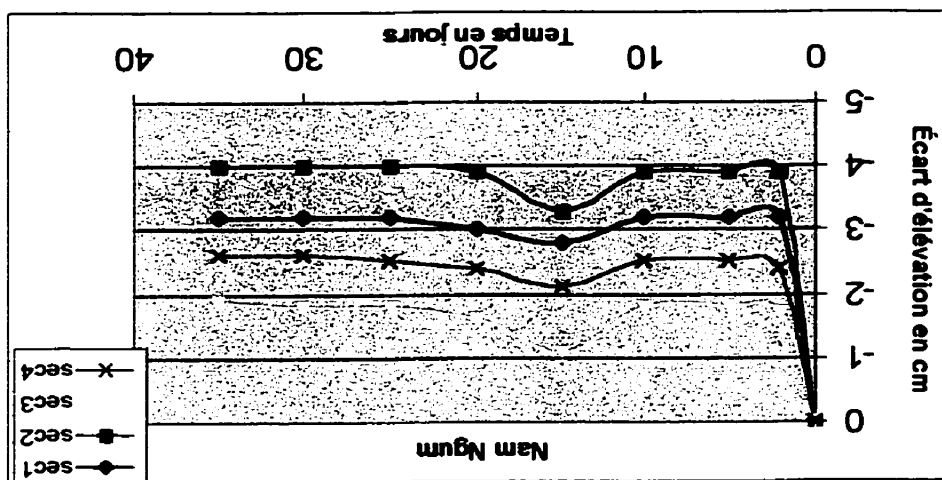
Figure 4.45 Courbe d'incision du lit de cinq premières sections en amont pour la récurrence de 10 ans

d'incision atteint de 3.5 cm (récurrence de 2 ans) à 4 cm (récurrence de 100 ans).

Selon les figures 4.44, 4.45, 4.46 et 4.47 nous trouvons que la profondeur maximale

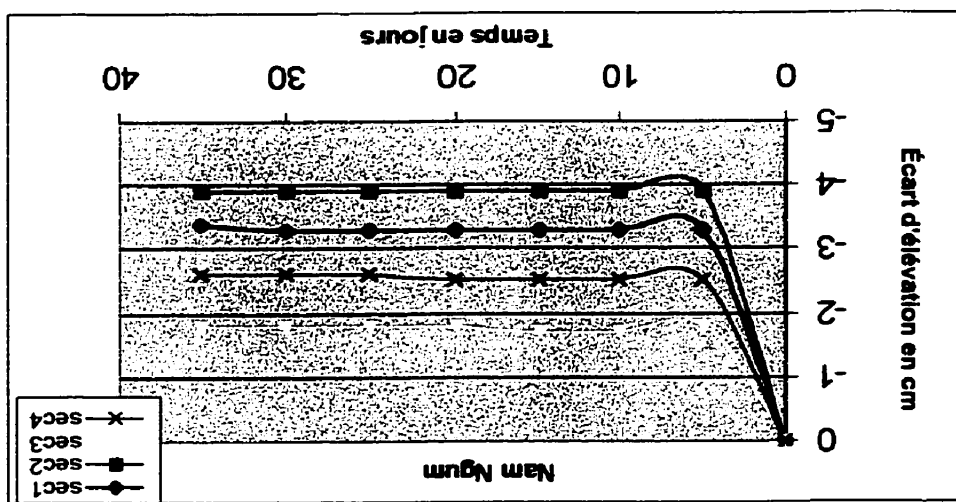
récurrence de 100 ans

Figure 4.47 Courbe d'incision du lit de quatre premières sections en amont pour la



récurrence de 20 ans

Figure 4.46 Courbe d'incision du lit de quatre premières sections en amont pour la



Les figures de 4.48 à 4.51 ci-dessous montrent l'évolution du lit le long du segment étudié de la Nam Ngum pour des débits liquides de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans.

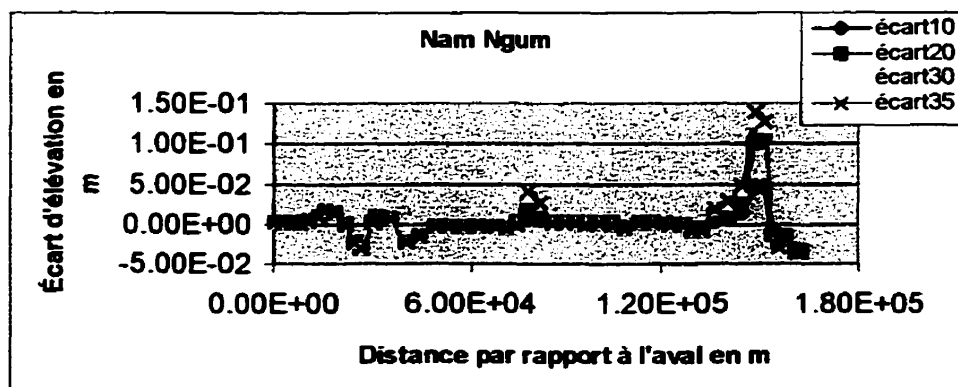


Figure 4.48 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 2 ans. Voir la légende de figure 4.6.

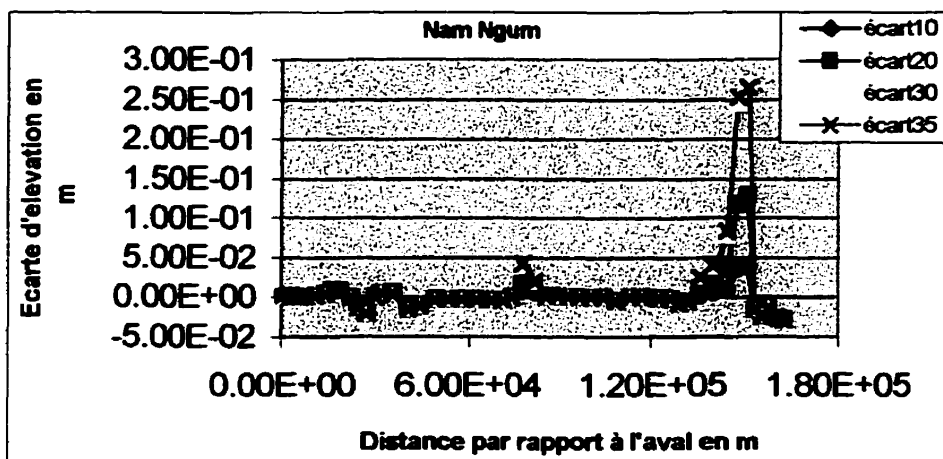


Figure 4.49 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 10 ans. Voir la légende de figure 4.6.

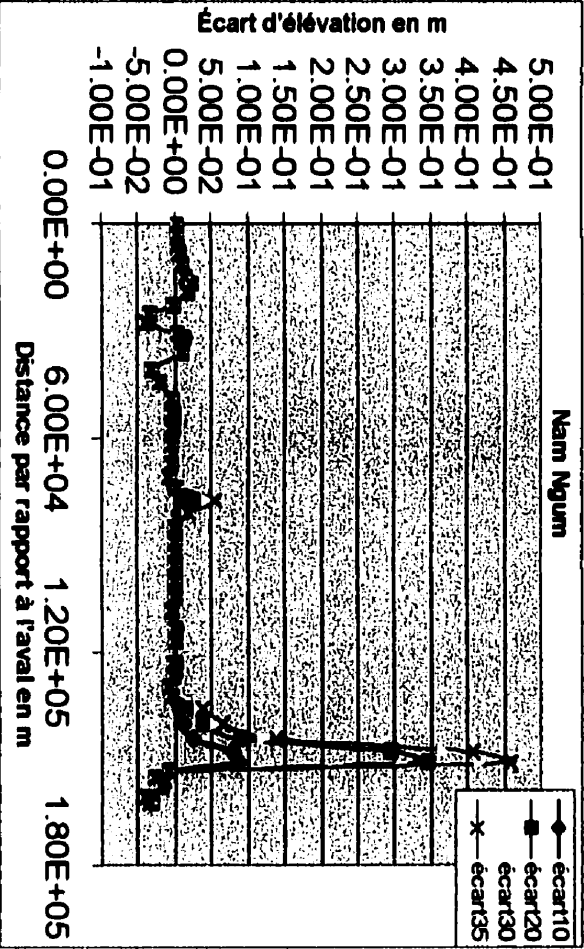


Figure 4.50 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 20 ans. Voir la légende de figure 4.6.

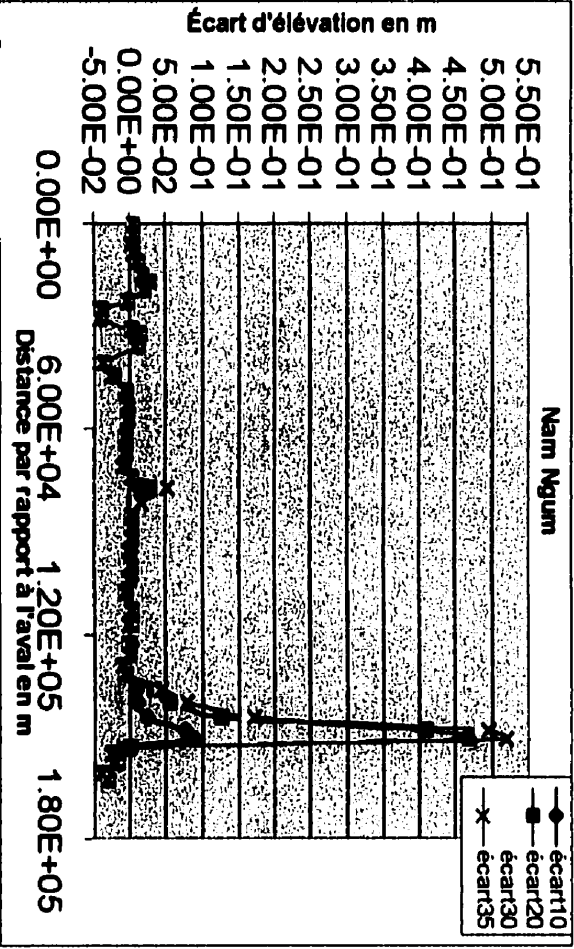


Figure 4.51 Courbe d'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 100 ans. Voir la légende de figure 4.6.

La capacité de transport solide de première section en amont et de section 24 pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans est présentée par les figures ci-dessous. Nous constatons que le débit solide maximal peut atteindre de 83398 tonnes/jour (récurrence de 2 ans) à 408322 tonnes/jour (récurrence de 100 ans) à la première section et de 44444 tonnes/jour (récurrence de 2 ans) à 222332 tonnes/jour (récurrence de 100 ans) à la section 24.

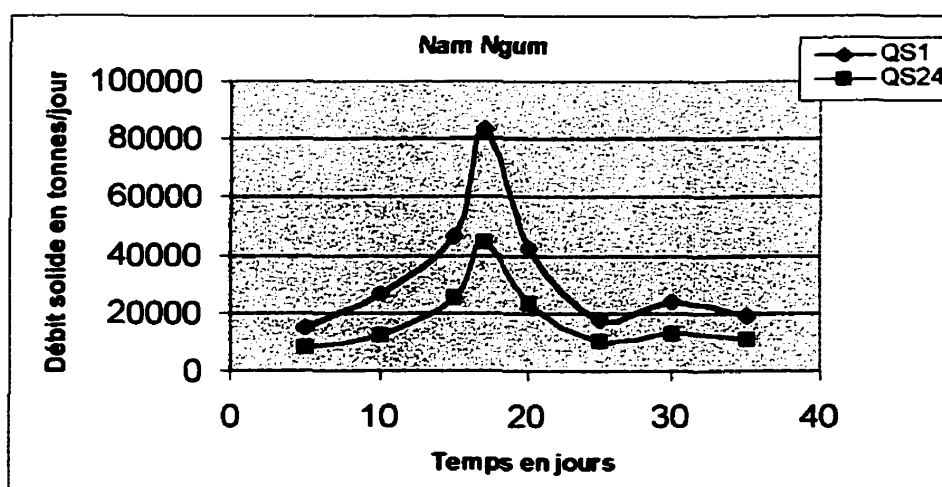


Figure 4.52 Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 2 ans

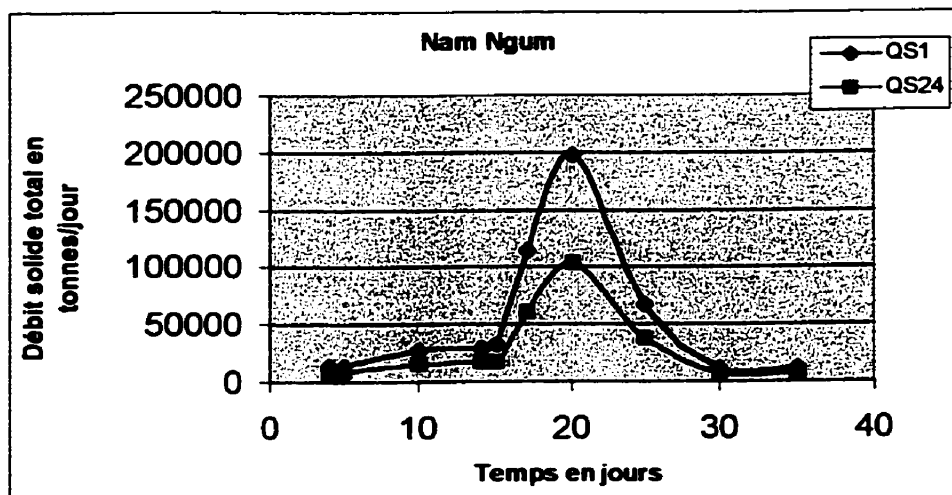


Figure 4.53 Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 10 ans

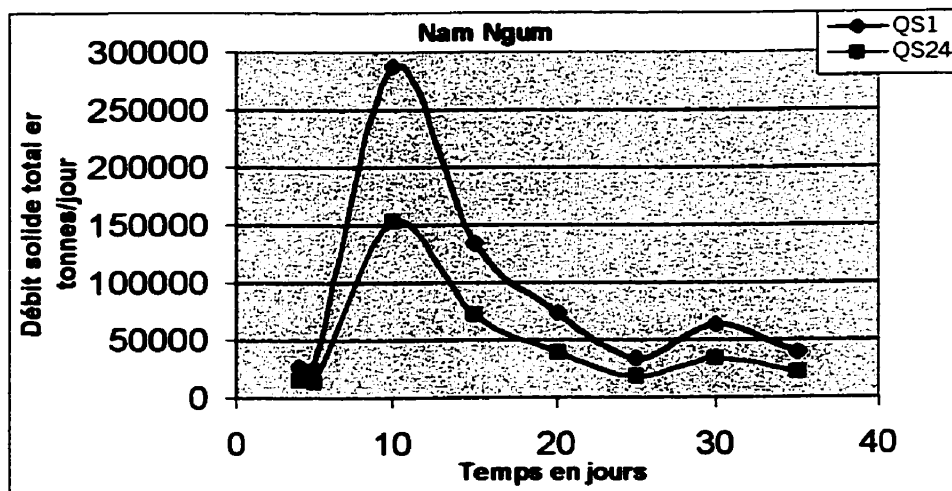


Figure 4.54 Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 20 ans.

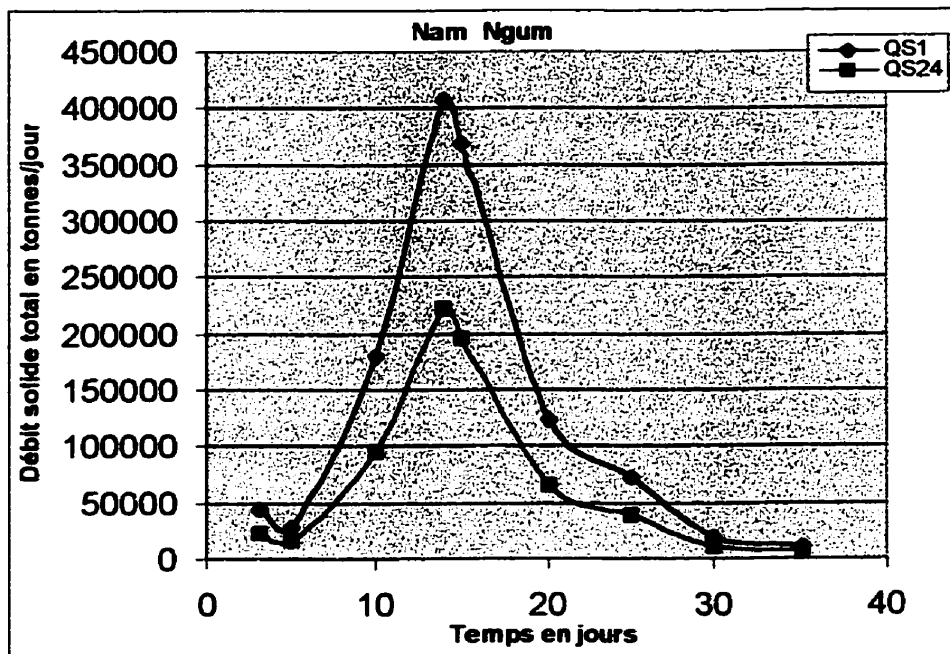


Figure 4.55 Courbe de débit solide total des sections 1 et 24 pour la récurrence de 100 ans.

Le dépôt des sédiments dans le tronçon entre Tha Lat (section 1) et Tha Ngone (section 24) pour les récurrences étudiées est présenté par la figure 4.56 ci-après. Selon cette figure, nous trouvons que le dépôt maximal atteint une valeur égale à 38954 tonnes/jour, 93065 tonnes/jour, 135122 tonnes/jour et 185990 tonnes/jour, pour les récurrences respectives de 2, 10, 20 et 100 ans.

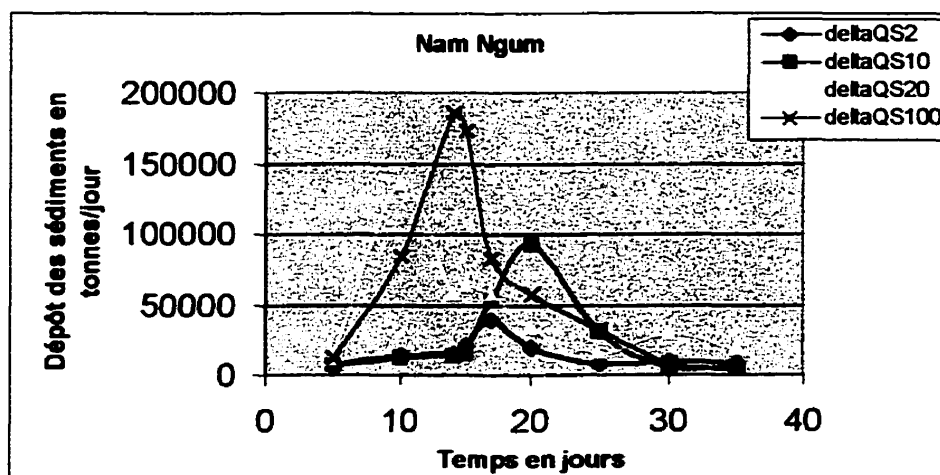


Figure 4.56 Courbe de dépôt des sédiments dans le tronçon Tha Lat – Tha Ngone pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans.

Selon les résultats obtenus, nous remarquons que plus des apports sédimentaires entrants à l'amont du segment étudié sont grands, plus des dépôts dans le fond de ce segment sont également grands. En conclusion, en cas de déforestation en amont du bassin ce segment de la rivière subirait de fortes dépositions susceptibles d'y aggraver les conséquences d'inondation après quelques années.

4.3 Discussion

Les figures de 4.4 à 4.56 montrent les résultats de simulation de l'évolution sédimentaire dans le tronçon Tha Lat- Pak Ngum de la Nam Ngum en utilisant le modèle GSTARS 2.0 avec l'équation de transport des sédiments de Yang 1979. Dans trois cas d'étude: la situation actuelle, celle résultante de la construction d'un barrage en amont et celle résultante d'une déforestation partielle du bassin en amont, nous avons simulé l'évolution sédimentaire avec des débits liquides de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans. Selon les résultats obtenus, nous trouvons que, pour les mêmes débits liquides de récurrence donnée, des débits solides sont différents d'un cas de simulation à l'autre.

À titre d'exemple, la figure 4.57 ci-dessous montre la différenciation des débits solides de trois cas d'étude pour la première section en amont et la section 25 au milieu du segment étudié pour des débits liquides réels de récurrence de 10 ans.

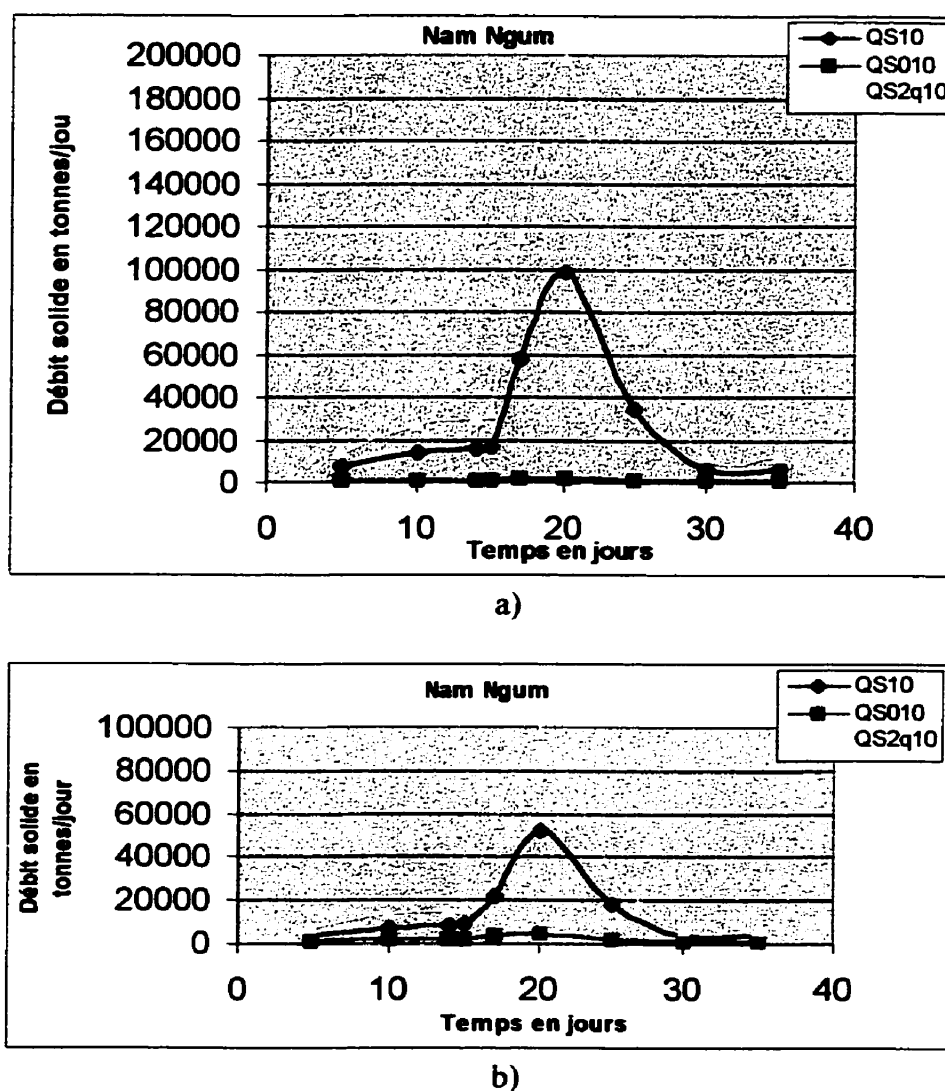


Figure 4.57 Comparaison des débits solides de trois cas étudiés pour la récurrence de 10 ans¹ dans: a) la section 1 en amont ; b) la section 25 au milieu

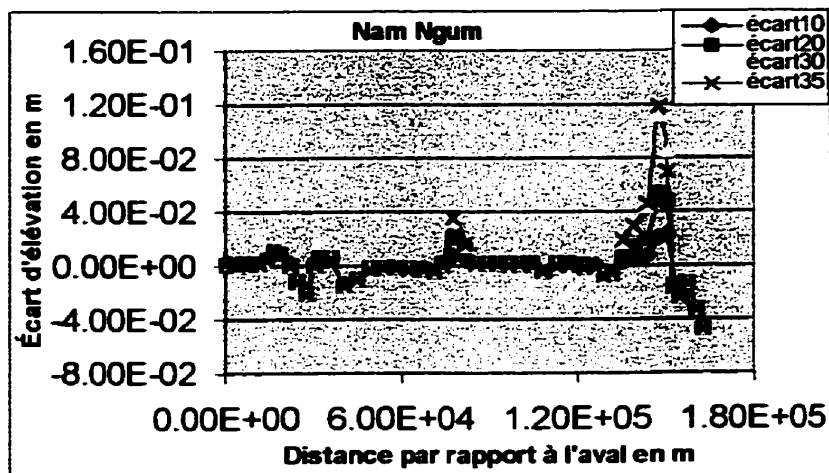
¹ QS10: débit solide de récurrence de 10 ans pour le cas de situation existante; QS010 : débit solide de récurrence de 10 ans pour le cas d'ajout d'un barrage en amont du segment étudié; QS2q10 : débit solide de récurrence de 10 ans pour le cas de déforestation

Selon la figure 4.57, pour les trois cas de simulation, nous constatons que dans le processus de l'évolution sédimentaire du bief Tha Lat- Pak Ngum, il y a décantation. On retrouve deux zones de décantation, l'une en amont (sections 6 et 7) et l'autre au milieu (sections 24 et 25). Pour le cas d'ajout d'un barrage en amont du segment étudié, le lit de ce segment a cette fois tendance à se creuser par manque d'apport sédimentaire.

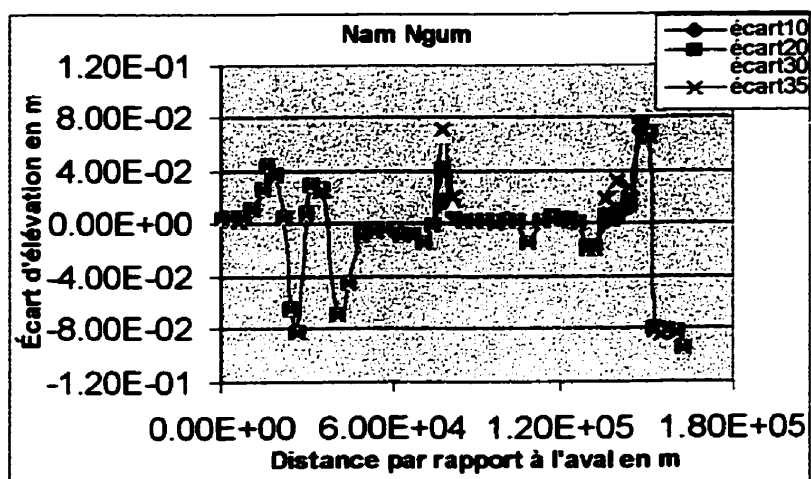
En conclusion, pour les trois cas d'étude, dans le processus de l'évolution du lit du tronçon Tha Lat – Pak Ngum nous trouvons que:

1. Il y a deux bassins décantation formés: l'un en amont et l'autre au milieu.
2. Pour le cas d'ajout d'un barrage en amont du segment étudié, le lit de ce segment a tendance à se creuser partout.

Les résultats de simulation sont dépendants de l'équation de transport solide utilisée comme le montre la figure 4.58 suivante. Cette figure illustre l'évolution du lit du segment choisi en comparant des résultats de simulation de deux équations de transport des sédiments, l'une d'Ackers-White (1990) et l'autre de Yang (1979) avec le même modèle GSTARS 2.0, pour des débits liquides de récurrence de 10 ans et pour le cas de situation existante.



a)



b)

Figure 4.58 Comparaison l'évolution du lit du bief Tha Lat-Pak Ngum pour la récurrence de 10 ans par l'équation de: a) Yang (1979), b) Ackers-White (1990). Voir la légende de figure 4.6.

Si les taux d'évolution prédits sont légèrement différents, les tendances sont bien confirmées localement et les conditions sont donc valides en regard des limitations de chaque formule.

Pour les trois cas d'étude, la quantité des sédiments déposés (érodés) dans le fond du tronçon étudié est différente d'un cas d'étude à l'autre et elle dépend des apports solides entrant en amont. Nous trouvons que plus les apports solides entrant en amont sont grands plus des dépôts des sédiments sont également grands. Au contraire, plus des apports solides entrant en amont sont petits plus la quantité d'érosion du lit est vraiment grande.

Les tableaux ci-après résument les résultats de la simulation avec le modèle GSTARS 2.0, pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans de trois cas d'étude.

Tableau 4.1 Vitesse d'écoulement et quantité des sédiments entrant et quittant le tronçon Tha Lat – Pak Ngum après 35 jours de simulation pour le cas de situation existante².

Réurrence T (ans)	Vitesse, V(m/s)	SDE (m ³)	SDQ (m ³)	ΔSD (m ³)
2	$0.74 \leq V \leq 1.86$	317438	202988	114450
10	$0.73 \leq V \leq 2.42$	573672	346812	226860
20	$0.82 \leq V \leq 2.55$	961826	577766	384060
100	$0.71 \leq V \leq 2.62$	1186910	705850	481060

² SDE: quantité des sédiments entrants; SDQ: quantité des sédiments quittants; ΔSD: quantité des sédiments déposés (érodés) dans le fond du segment étudié.

Tableau 4.2 Vitesse d'écoulement et quantité des sédiments entrant et quittant le tronçon Tha Lat – Pak Ngum après 35 jours de simulation pour le cas d'ajout d'un barrage en amont du segment étudié.

Réurrence T (ans)	Vitesse, V(m/s)	SDE (m ³)	SDQ (m ³)	ΔSD (m ³)
2	$0.74 \leq V \leq 1.86$	0	51971	-51974
10	$0.73 \leq V \leq 2.42$	0	58822	-58825
20	$0.82 \leq V \leq 2.55$	0	74724	-74728
100	$0.71 \leq V \leq 2.62$	0	79373	-79376

Tableau 4.3 Vitesse d'écoulement et quantité des sédiments entrant et quittant le tronçon Tha Lat – Pak Ngum après 35 jours de simulation pour le cas de déforestation dans le bassin de la Nam Ngum.

Réurrence T (ans)	Vitesse, V(m/s)	SDE (m ³)	SDQ (m ³)	ΔSD (m ³)
2	$0.74 \leq V \leq 1.86$	634235	351283	282790
10	$0.73 \leq V \leq 2.42$	1146196	613996	532200
20	$0.82 \leq V \leq 2.55$	1921701	1028651	893050
100	$0.71 \leq V \leq 2.62$	2371501	1261901	1109600

Les figures suivantes montrent la quantité accumulée des sédiments qui quitte le tronçon étudié en fonction du temps pour les trois cas d'étude. Cette quantité a, par exemple, une incidence directe sur la turbidité des eaux.

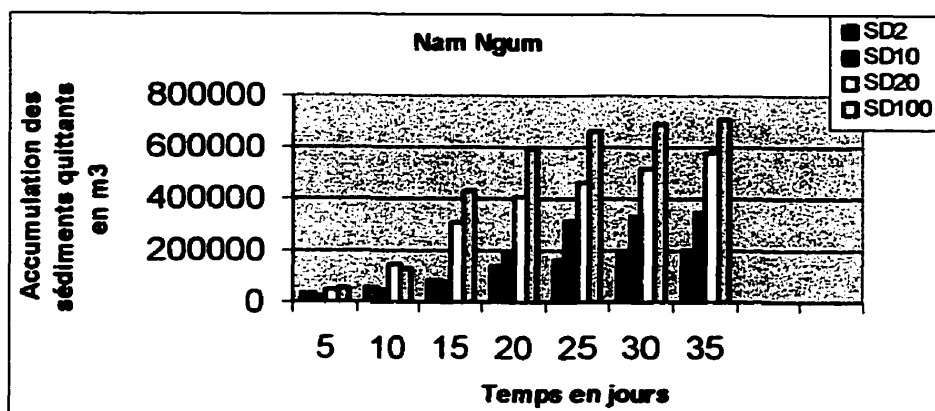


Figure 4.59 Courbe de sédiments quittant le tronçon Tha Lat-PakNgum pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans³ et pour le cas de situation existante.

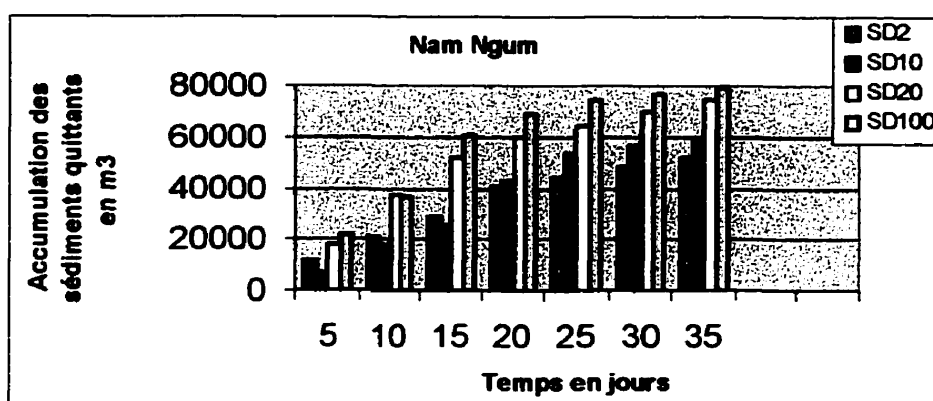


Figure 4.60 Courbe de sédiments quittant le tronçon Tha Lat-Pak Ngum pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans et pour le cas d'ajout d'un barrage en amont du segment étudié.

³ SD2: sédiments quittant le tronçon de récurrence de 2 ans; SD10: sédiments quittant le tronçon de récurrence de 10 ans; SD20: sédiments quittant le tronçon de récurrence de 20 ans; SD100: sédiments quittant le tronçon de récurrence de 100 ans

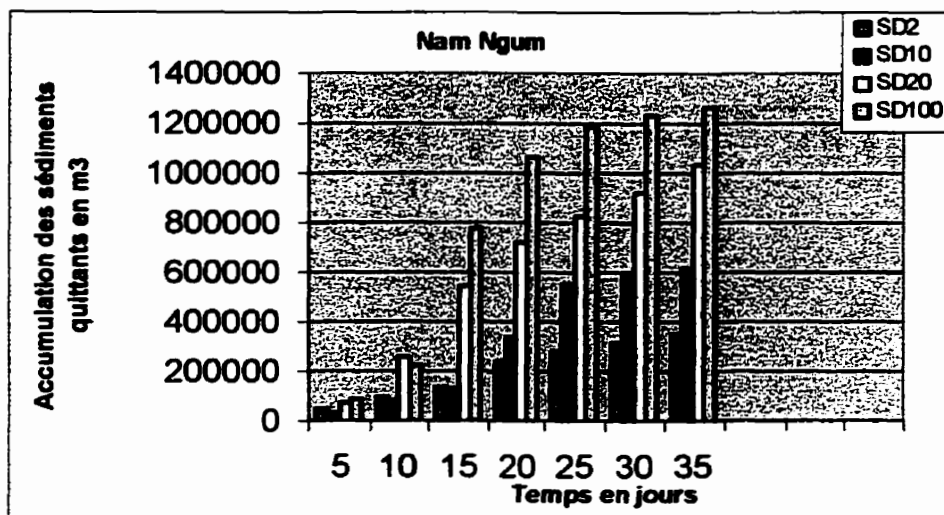


Figure 4.61 Courbe de sédiments quittant le tronçon Tha Lat-Pak Ngum pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans et pour le cas de déforestation dans le bassin de la Nam Ngum.

Selon les trois figures mentionnées ci-dessus, nous trouvons que la charge sédimentaire totale transmise en aval la plus grande est celle du cas où il y a une forte déforestation dans le bassin de la Nam Ngum. Alors, pour réduire la quantité de sédiments transportés en aval il faut minimiser la déforestation et la compenser par un programme de plantation et de gestion du sol orienté vers une limitation de l'érosion de surface.

CHAPITRE V

CONCLUSION

L'eau et les cours d'eau sont au cœur des préoccupations de la société contemporaine. Dès siècles d'aménagement ont eu pour objectifs de sécuriser les populations, les activités riveraines, de faire produire aux cours d'eau du poisson, de l'énergie, de l'eau potable, d'évacuer les eaux usées, etc. Il est donc nécessaire de mieux connaître les processus naturels qui commandent la géomorphologie et le fonctionnement des cours d'eau. En plus, dès que l'on veut construire un pont, un barrage et faire une analyse de l'évolution du lit d'un cours d'eau, on est forcément amené de connaître les débits extrêmes et les niveaux d'eau correspondant à ces débits pour les récurrences données.

Ce mémoire présente un modèle d'évolution sédimentaire du segment Tha Lat-Pak Ngum de la Nam Ngum localisée au Laos. Une étude hydrologique préalable nous indique que le débit de la Nam Ngum est étroitement corrélé au type de précipitations. Il commence à augmenter au début de la saison des pluies (mai) pour atteindre une pointe en août, septembre et octobre. Après octobre, le débit retombe rapidement et il atteint son minimum en mars – avril. Pour les récurrences de 2, 10, 20 et 100 ans, les débits maximaux annuels à Tha Lat (en amont du segment étudié) sont respectivement de 2039 m³/s, 3150 m³/s, 3618 m³/s et 4526 m³/s. Les niveaux maximums à Pak Ngum (en aval) correspondant aux débits maximaux mentionnés ci-dessus sont 11.6 m, 14 m, 14.8 m et 16.4 m.

L'étude des données sédimentologiques nous montre que la concentration en sédiments est souvent le facteur prépondérant dans la détermination du débit solide de la Nam Ngum à un instant donné. Dans ce cas, il n'existe pas une seule et unique relation entre la concentration en sédiments et toute variable représentant la capacité de transport solide de cette rivière. Du point de vue de la maîtrise de l'évolution sédimentaire, il est

important également de noter que la concentration en sédiments tend à varier beaucoup pendant une crue. Comme l'écoulement initial rencontre davantage de matériaux transportables que les écoulements qui s'en suivent, la quantité des sédiments transportés a tendance être bien plus élevée au début de la crue qu'à la fin. La présente étude montre que la concentration (en mg/l) en sédiments dans le segment étudié est proportionnelle au débit liquide (en m³/s). Cette relation se présente sous la forme: $C = k Q_l$. Selon notre étude $C = 0.115 Q_l - 0.0065$ à Tha Lat (amont) et $C = 0.0822 Q_l + 0.011$ à Tha Ngone (milieu). Les débits solides moyens annuels en tonnes par jour à Tha Lat et à Tha Ngone ont été estimés par la méthode FDRC. La relation entre le débit solide Q_s et le débit liquide Q_l à Tha Lat et à Tha Ngone se présente respectivement sous la forme: $Q_s = 0.00994 Q_l^2$, $Q_s = 0.007102 Q_l^2$. Les débits solides atteignent leur valeur maximale au mois d'août et de septembre.

D'après les résultats de la simulation de l'évolution sédimentaire dans le tronçon Tha Lat – Pak Ngum de la Nam Ngum, les trois cas d'étude montrent que pour des débits liquides de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans, le tronçon mentionné du cours d'eau naturel transportant des sédiments est généralement en équilibre. Dans ces cas, il y a deux bassins de décantation formés: l'un en amont et l'autre au milieu. Particulièrement, pour le cas d'ajout d'un barrage en amont du segment étudié et pour les récurrences de 10, 20 et 100 ans, le bassin de décantation au milieu est disparu et un nouveau bassin de décantation s'est formé en aval (sections 40 et 41). Dans ce cas pour les mêmes débits liquides de récurrence donnée, le lit de ce tronçon a tendance cette fois, à se creuser, à long terme. S'il devait y avoir une forte déforestation dans le bassin de la Nam Ngum, le lit du tronçon étudié aurait plutôt tendance à se remplir par les sédiments.

En général, le processus de creusement ou de remblaiement du lit du segment étudié de la Nam Ngum peut avoir plusieurs conséquences indésirables sur l'environnement et l'économie en aval. Ces phénomènes se déplacent progressivement vers l'aval jusqu'à atteindre le point où les sédiments transportés entraînent une stabilisation du lit; et un

équilibre se rétablit entre un profil en long plus doux et un transport solide plus réduit. Certains aspects positifs et /ou négatifs du processus de creusement et de remblaiement du lit de ce segment seront aussi observés. Nous citerons entre autre l'abaissement du niveau de l'eau et le drainage des terres situées dans le lit majeur. Les espèces biologiques du cours d'eau en aval seront affectées plus spécialement par la présence de matériaux plus grossiers au fond du lit et par la modification de la croissance végétale le long des berges et de la qualité de l'eau. L'entrée et le dépôt des sédiments dans le fond du cours d'eau peuvent avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur le processus d'eutrophisation. En présence de substances nutritives appropriées, de carbone et de lumière solaire, des algues apparaissent. Quand elles commencent à proliférer, les conséquences de ce phénomène sont que la clarté de l'eau est réduite, que la quantité d'oxygène dans l'eau diminue et que la qualité de l'eau peut se dégrader. Ce qui engendre une augmentation du coût du traitement de l'eau pour se débarrasser des microparticules, des odeurs, etc. Les dépôts de sédiments peuvent constituer l'habitat de certains organismes animaux ou végétaux indispensables à la chaîne alimentaire de certaines espèces de poissons pouvant vivre dans ce cours d'eau.

Mais, la déposition excessive des sédiments dans le segment étudié réduit aussi sa capacité d'écoulement, dérange la navigation et augmente le risque d'inondation. Les conséquences économiques, dont le coût de dragage des sédiments, deviennent alors importantes.

En conclusion, le creusement et le remblaiement du lit d'un cours d'eau ont des effets positifs et négatifs sur la qualité de l'eau, la vie riveraine, l'environnement et l'activité économique d'un pays.

Généralement, nous savons que l'érosion de la surface est la source des apports solides vers les cours d'eau. Il est donc utile de connaître les sources de l'érosion et les principes de contrôle de cette érosion ainsi que de la sédimentation. Les sources

principales de l'érosion sont l'agriculture, les mines et les constructions des différents ouvrages sur la rivière. L'agriculture produit le plus grand pourcentage de la charge sédimentaire totale qui est acheminée vers les cours d'eau. La construction cause aussi différentes formes de l'érosion.

Par définition, l'érosion est l'ensemble des phénomènes qui, à la surface du globe terrestre ou au fond du lit d'un cours d'eau, enlèvent tout ou une partie des terrains existants et modifient ainsi que le relief. Les sédiments sont fournis par les sols qui ont été érodés. Alors, le contrôle de l'érosion devient la prévention et la minimisation de l'érosion de surface. Le contrôle des sédiments peut alors consister à prendre ou à bloquer des particules des sols qui seraient acheminés vers les cours d'eau.

À partir de la définition mentionnée, nous proposons essentiellement les principes de contrôle de l'érosion et des sédiments suivants :

- Maintenir les végétaux partout;
- Minimiser la déforestation;
- Planter des arbres et des végétaux dans les terrains dénudés;
- Maintenir la vitesse de l'écoulement basse;
- Minimiser la pente de l'écoulement;
- Laisser ouvertes les vannes d'évacuation des sédiments de barrages;
- Inspecter et maintenir des mesures de contrôle, etc.

BIBLIOGRAPHIE

ACKERS. P, WHITE W. R, (1973). Sediment transport: New Approach and analysis. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 99, No.HY11, 2041 - 2060.

AXELSSON. V, (1992). *Sedimentation in the Nam Ngum reservoir Lao PDR*. Department of Physical Geography, Uppsala University , AB HYDROCONSULT Uppsala, SWEDEN.

American Society for Testing and Materials (ASTM), (1999). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soil*.

BRAVARD. J.P, PETIT. F, (1997). *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Armand Colin/Masson, Paris.

Center for Development and Environment (CDE), (1997a). *Mekong Watershed Classification: The WSC map users guide*. Mekong River Commission, Bangkok.

Center for Development and Environment (CDE), (1997b). *GIS- Application for Watershed Classification: The WSC data users guide*. Mekong River Commission, Bangkok.

CHOW, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Mcgraw-Hill Book Co., Inc., New York, N. Y.

COWAN, W. L. (1956). *Estimating Hydraulic Roughness Coefficients*. Agr. Engr. Vol. 37, No. 7.

CRAWFORTH, C. G. (1991). Estimation of Suspended-sediment Rating Curves and Mean Suspended-sediment Loads. *Journal of Hydrology, Vol. 129*.

DEMIROZ, E. (1973). Determination of The Suspended Sediment Transport Relationships Using Direct Sampling Data. *International Association For Hydraulic Research (IAHR), 1*, 391 –398.

DIAS, M. (1973). Le modèle du Guadaira à Seville et l'évolution du fond du lit. Calcul du débit qui modèle un cours d'eau. *Association Internationale de Recherches Hydrauliques (IAHR), 1*, 189- 194.

ENGELUND, F., HANSEN, E., (1972). A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Stream. *Teknisk Forlag, Technical Press, Copenhagen, Danmak*.

FORS, M., INTHAVONG, C, (April 1994). *Erosion Risk Map of the Lao PDR. Nam Ngum Watershed*. Watershed management section, National Office for Conservation & Watershed Management ; Department of Forestry Ministry of Agriculture & Forestry Government of the Lao PDR.

GOLE, C. V., TARAPORE, Z. S. et DIXIT, J.D. (1973). Applicability of Sediment Transport Formulae to Natural Streams. *International Association For Hydraulic Research (IAHR), 1*, 429-436.

GOLDMAN, S. J., JACLSON, K., TARAS, A. et BURSZTYNSKY, P.E. (1986). *Erosion and Sediment Control Handbook*. Mc Draw – Hill Book Company.

GRAF, W. H. (1993). *Hydraulics of Sediment Transport*. Lehigh University.

GRAF, W. H., ALTINAKAR, M.S. (1993). *Hydraulique fluviale. Écoulement non permanent et phénomènes de transport*. Tome 2. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

GRAF, W. H. (1971). *Hydraulics of Sediment Transport*. . McDraw – Hill Book Company. New York.

GRAY.D.M. (1972). *Manuel des principes d'hydrologie*. Comité national canadien de la décennie hydrologique internationale, Ottawa, Canada.

HU, C., HUI, Y. (May 1996). Bed-Load Transport. I :Mechanical Characteristics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122, No 5, 245-254.

HARDÉN. P. O. and SUNDBORG. A. (1997). *The Lower Mekong Basin Suspended Sediment Transport and Sedimentation Problems*. MEKONG COMMITTEE.

Integrated Resources Center (IRC), (March 1994). *Watersheds of the Lao PDR*. Watershed management section, National Office for Conservation & Watershed Management ; Department of Forestry Ministry of Agriculture & Forestry Government of the Lao PDR.

KARIM, F., (1998). Bed Material Discharge Prediction for Nonuniform Bed Sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, No 6, 597-603.

LLMAS, J., (1985). *Hydrologie générale: Principes et applications*. Gaëtan Mortin, Chicoutimi, Québec, Canada.

LAURSEN, E. M., (1958). The Total Sediment Load of Streams. *Journal of Hydraulics Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers*. 84, No HY 1, 1530-1-1530-36.

LINSLEY, R. K., KOHLER, JR MAX. A., PAULHUS, JOSEPH L.H., (1982). *Hydrology for Engineers*. B.J Clark, M.E. Margolies, Kingsport Press, Inc, U.S.A.

MEHTA, A. J., HAYTER, E. J., PAKER, R. et al, (August 1989). Cohesive Sediment Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, No 8, 1076-1085.

MOLINAS, A., WU, B., (1998). Effect of Size Gradation on Transport of Sediment Mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, No 8, 786-793.

Mekong River Commission (MRC), (1963, 1968-1970, 1982-1993). *Low Mekong Hydrologic Yearbook, 1*. Interim Committee for Co-ordination of Investigations of the Lower Mekong Basin.

Ministry of Agriculture and Forestry (MAF), Department of Forestry, Center for Protected Areas and Watershed Management, (1998). *Nam Ngum Watershed Management- Lao PDR*. Mid-Term Report Annex 2. Initial review of Nam Ngum watershed forest conditions and watershed zoning for sustainable conservation and development, Vientiane Lao PDR.

Ministry of Agriculture and Forestry (MAF), Department of Forestry, Center for Protected Areas and Watershed Management, (August 1998). *Nam Ngum Watershed Management- Lao PDR*. Mid-Term Report Annex 5. Preliminary Hydrologic Review of the Nam Ngum Watershed, Vientiane, Lao PDR.

MIGNIOT. C, (1989). Tassement et rhéologie des vases. Deuxième partie. *La Houille Blanche* No 2. 95-111.

MCCUEN, R. H., (1989). *Hydrologic Analysis and Design*. Department of civil engineering University of Maryland.

NIAN-SHENG CHENG. (1997). Simplified Setting Velocity Formula For Sediment Particule. *Journal of Hydraulis Engineering*, 123, No 2, 149-152.

PETERSEN, M.S., (1986). *River Engineering*. Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona.

PATEL, P. L., RANGA RAJU, K. G., (1999). Critical Tractive Stress of Nonuniform Sediments. *Journal of Hydraulic Research*, 37, No 1, 39 - 57.

PACHECO-CEBALLOS, R., (August 1998). Calculation of Channel and River Velocities. *Journal of hydraulic engineering*, 24, No 8, 869 - 872.

ROCHE, M. (1973). *Hydrologie de surface*. ORSTOM, Paris.

RAHUEL, J. L., HOLLY, F. M., CHOLLET, J. P., BELLEUDY, P. J. et YANG, G., (1989). Modeling of River Evolution for Bedload Sediment Mixtures. *Journal of hydraulic engineering*, 115, No 11, 1521 - 1541.

SWAMEE, P. K., OJHA, CHANDRA SHAKHAR P., (1991). Drag Coefficient And Fall Velocity of Nonspherical Particales. *Journal of Hydraulis Engineering*, 117, No 5, 660-667.

STIGTER, C., POST, G. R., KEYSER, D. J. et STRAND, R. I. (1989). *Maîtrise de l'alluvionnement des retenues. Recommandations*. Commission Internationale des Grands Barrages, 75008-Paris.

STELCZER, K. (1981). *Bed-Load Transport*. Theory and Practice. Water Resources Publications, Michigan U.S.A.

U S. Army Corps of Engineers, (1998). *HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual, Version 2.0*. Hydrologic Engineering Center.

VAN RIJN, (1984). Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110, No 10, 1431 - 1455.

VAN RIJN, (1984). Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110, No 11, 1613 - 1753.

Water Resources Development Consultants (WATCO). (November 1984). *Inventaire des ressources hydrauliques du bassin inférieur du Mékong*. Comité interimaire pour la coordination des études sur le bassin inférieur du Mékong.

YALIN, M.S. (1977). *Mechanics of Sediment Transport*. 2nd edition, Oxford, New York, Pergamon Press.

YALIN, M.S. (1972). *Mechanics of Sediment Transport*. 1st edition, Oxford, New York, Pergamon Press.

YANG, C.T., FRANCISCO, J.M. (1999). Sediment Transport and River Morphologic Changes. *CADAM(European Concerted Action on Dambreak Modeling) Meeting Zaragola, Spain*.

YANG, C. T. et al (1998). *User's Manual for GSTARS 2.0*. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center. Sedimentation and River Hydraulics Group, Denver, Colorado.

YANG, C. T.,(1973). Incipient Motion and Sediment Transport. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 99, 1679-1704.*

YANG, C. T. (1979). Unit Stream Power Equation for Total. *Journal of the Hydrology, Vol. 40, 123-138.*

YANG, C. T.(1984). Unit Stream Power Equation for Gravel . *Journal of the Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 110, 1783-1797.*

ZHAO – YIN WANG., (1999). Experimental Study on Scour Rate and River Bed Inertia. *Journal of Hydraulic Research, 37, No 1, 17 - 37.*

Annexe 1

Calcul des débits moyens annuels de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans à Tha Lat.

Rang No	Année	Débit Q, m ³ /s	Y= lnQ m ³ /s	Moyen, Y ₁ , m ³ /s	Y- Y ₁ m ³ /s	(Y- Y ₁) ² (m ³ /s) ²	(Y- Y ₁) ³ (m ³ /s) ³
1	1990	795	6.6783	6.3505	0.3278	.10747	.03523
2	1982	641	6.6430	6.3505	0.2925	.08556	.02503
3	1985	612	6.4167	6.3505	0.0662	.00438	.00029
4	1987	608	6.4102	6.3505	0.0597	.00356	.00021
5	1993	496	6.2066	6.3505	-.1439	.02071	-.00298
6	1991	495	6.2046	6.3505	-.1459	.02128	-.00311
7	1989	481	6.1759	6.3505	-.1746	.03048	-.00532
8	1992	432	6.0684	6.3505	-.2821	.07958	-.02245
Σ						.35302	.026893

La variance des données a été calculée par la formule suivante :

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_1)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.35302}{7}} = 0.2245 \text{ m}^3/\text{s}$$

Puis, le coefficient de variation standard des données a été calculé par la formule suivante :

$$C_v = \frac{S_y}{Y_1} = \frac{0.2245}{6.3505} = 0.0354$$

Ensuite, nous calculons la déviation standard (g) en utilisant la formule ci-dessous :

$$g = \frac{n \sum (Y - Y_1)^3}{(n-1)(n-2)S_y^3} = \frac{8 * 0.026893}{7 * 6 * (0.2245)^3} = 0.4527$$

Enfin, des débits liquides moyens annuels de récurrence différente ont été déterminés par la formule ci-après :

$$Y_T = Y_1 (1 + C_{vy} K_T)$$

Pour la récurrence de 2 ans $K_2 = 0.0214$

$$Y_2 = 6.3505 (1 + 0.0354 * 0.0214) = 6.3553$$

$$Q_2 = e^{Y_2} = 575 \text{ m}^3 / s$$

Pour la récurrence de 10 ans $K_{10} = 1.2817$

$$Y_{10} = 6.3505 (1 + 0.0354 * 1.2817) = 6.6386$$

$$Q_{10} = e^{Y_{10}} = 765 \text{ m}^3 / s$$

Pour la récurrence de 20 ans $K_{20} = 1.645$

$$Y_{20} = 6.3505 (1 + 0.0354 * 1.645) = 6.7282$$

$$Q_{20} = e^{Y_{20}} = 836 \text{ m}^3 / s$$

Pour la récurrence de 100 ans $K_{100} = 2.3267$

$$Y_{100} = 6.3505 (1 + 0.0354 * 2.3267) = 6.8728$$

$$Q_{100} = e^{Y_{100}} = 985 \text{ m}^3 / s$$

Annexe 2

Calcul des débits maximaux de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans à Tha Lat.

Rang No	Année	Débit Q, m ³ /s	Y=lnQ m ³ /s	Moyen Y ₁ , m ³ /s	Y - Y ₁ m ³ /s	(Y - Y ₁) ² (m ³ /s) ²	(Y - Y ₁) ³ (m ³ /s) ³
1	1969	4570	8.4273	7.6109	0.8164	0.66651	0.54414
2	1982	2960	7.9929	7.6109	0.38204	0.14595	0.05576
3	1983	2540	7.8399	7.6109	0.22902	0.05245	0.01201
4	1990	2200	7.6962	7.6109	0.08531	0.00728	0.00062
5	1993	2020	7.6109	7.6109	0.00005	0.00000	0.0000
6	1986	1940	7.5704	7.6109	-0.04046	0.00164	-0.00006
7	1989	1760	7.4731	7.6109	-0.13783	0.01899	-0.00262
8	1987	1750	7.4674	7.6109	-0.14353	0.02060	-0.00296
9	1991	1730	7.4559	7.6109	-0.15503	0.02403	-0.00373
10	1988	1540	7.3395	7.6109	-0.27136	0.07363	-0.01998
11	1985	1520	7.3265	7.6109	-0.28444	0.08091	-0.02301
12	1992	1250	7.1309	7.6109	-0.48001	0.23040	-0.1106
Σ						1.32241	0.44957

La variance des données a été calculée par la formule suivante :

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_1)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{1.32241}{11}} = 0.3467 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Puis, le coefficient de variation standard des données a été calculé par la formule suivante :

$$C_w = \frac{S_y}{Y_1} = \frac{0.3467}{7.6109} = 0.04566$$

Ensuite, nous calculons la déviation standard (g) en utilisant la formule ci-dessous :

$$g = \frac{n \sum (Y - Y_1)^3}{(n-1)(n-2)S_y^3} = \frac{12 * 0.44957}{11 * 10 * (0.3467)^3} = 0.11768$$

Enfin, des débits liquides maximums annuels de récurrence différente ont été déterminés par la formule ci-après :

$$Y_T = Y_1 (1 + C_w K_T) = Y_1 + z S_y$$

Pour la récurrence de 2 ans $K_2 = 0.0214$

$$Y_2 = 7.6109 (1 + 0.04556 * 0.0214) = 7.62048$$

$$Q_2 = e^{Y_2} = 2039 \text{ m}^3 / s$$

Pour la récurrence de 10 ans $K_{10} = 1.2817$

$$Y_{10} = 7.6109 (1 + 0.04556 * 1.2817) = 8.0553$$

$$Q_{10} = e^{Y_{10}} = 3150 \text{ m}^3 / s$$

Pour la récurrence de 20 ans $K_{20} = 1.6458$

$$Y_{20} = 7.6109 (1 + 0.04556 * 1.6458) = 8.19379$$

$$Q_{20} = e^{Y_{20}} = 3618 \text{ m}^3 / s$$

Pour la récurrence de 100 ans $K_{100} = 2.3267$

$$Y_{100} = 7.6109 (1 + 0.04556 * 2.3267) = 8.41756$$

$$Q_{100} = e^{Y_{100}} = 4526 \text{ m}^3 / s$$

Annexe 3

Calcul des niveaux moyens annuels de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans à Pak Ngum

Rang No	Année	Niveau H _{moyen} , m	Y=lnH m	Moyen Y ₁ , m	Y- Y ₁ m	(Y- Y ₁) ² m ²	(Y- Y ₁) ³ m ³
1	1982	5.42	1.691	1.5589	0.13297	0.04768	0.00235
2	1985	4.98	1.60543	1.5589	0.04743	0.00225	0.00011
3	1983	4.93	1.59534	1.5589	0.03734	0.00139	0.00005
4	1987	4.32	1.46325	1.5589	-.09475	0.00899	-.00085
5	1988	4.20	1.43508	1.5589	-.12300	0.01512	-.00186
Σ						0.04543	-.0002

La variance des données a été calculée par la formule suivante :

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_1)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0.04543}{4}} = 0.1066 \text{ m}^3 / s$$

Puis, le coefficient de variation standard des données a été calculé par la formule suivante :

$$C_{vy} = \frac{S_y}{Y_1} = \frac{0.1066}{1.5589} = 0.0684$$

Ensuite, nous calculons la déviation standard (g) en utilisant la formule ci-dessous :

$$g = \frac{n \sum (Y - Y_1)^3}{(n-1)(n-2)S_y^3} = \frac{5 * (-0.0002)}{4 * 3 * (0.1066)^3} = -0.0688$$

Enfin, des niveaux moyens annuels de récurrence différente ont été déterminés par la formule ci-après :

$$Y_T = Y_1 (1 + C_{vy} K_T) = Y_1 + z S_y$$

Pour la récurrence de 2 ans $K_2 = 0.0214$

$$Y_2 = 1.5589(1 + 0.0684 * 0.0214) = 1.5611$$

$$H_2 = e^{Y_2} = 4.75 \text{ m}$$

Pour la récurrence de 10 ans $K_{10} = 1.2817$

$$Y_{10} = 1.5589(1 + 0.0684 * 1.2817) = 1.695$$

$$H_{10} = e^{Y_{10}} = 5.44 \text{ m}$$

Pour la récurrence de 20 ans $K_{20} = 1.6458$

$$Y_{20} = 1.5589(1 + 0.0684 * 1.6458) = 1.733$$

$$H_{20} = e^{Y_{20}} = 5.66 \text{ m}$$

Pour la récurrence de 100 ans $K_{100} = 2.3267$

$$Y_{100} = 1.5589(1 + 0.0684 * 2.3267) = 1.806$$

$$H_{100} = e^{Y_{100}} = 6.10 \text{ m}$$

Annexe 4

Calcul des niveaux maximaux annuels de récurrence de 2, 10, 20 et 100 ans à Pak Ngum

Rang No	Année	Niveau H_{\max} , m	$Y=\ln H$ m	Moyen Y_1 , m	$Y - Y_1$ m	$(Y - Y_1)^2$ m^2	$(Y - Y_1)^3$ m^3
1	1978	13.95	2.63548	2.4514	0.18408	0.03388	0.00624
2	1982	12.7	2.54160	2.4514	0.09020	0.00814	0.00073
3	1984	12.1	2.49320	2.4514	0.04181	0.00175	0.00007
4	1985	11.93	2.47906	2.4514	0.02766	0.00765	0.00002
5	1983	11.89	2.47569	2.4514	0.02429	0.00059	0.00001
6	1987	10.76	2.37583	2.4514	-.07557	0.00571	-.00043
7	1988	8.66	2.15871	2.4514	-.29269	0.08567	-.02507
Σ						0.13650	-.01843

La variance des données a été calculée par la formule suivante :

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_1)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0.13650}{6}} = 0.1508 \text{ m}^3 / s$$

Puis, le coefficient de variation standard des données a été calculé par la formule suivante :

$$C_y = \frac{S_y}{Y_1} = \frac{0.1508}{2.4514} = 0.0615$$

Ensuite, nous calculons la déviation standard (g) en utilisant la formule ci-dessous :

$$g = \frac{n \sum (Y - Y_1)^3}{(n-1)(n-2)S_y^3} = \frac{7 * (-0.01843)}{6 * 5 * (0.1508)^3} = -1.254$$

Enfin, des niveaux maximums annuels de récurrence différente ont été déterminés par la formule ci-après :

$$Y_T = Y_1 (1 + C_{vy} K_T) = Y_1 + z S_y$$

Pour la récurrence de 2 ans $K_2 = 0.0214$

$$Y_2 = 2.4514(1 + 0.0615 * 0.0214) = 2.4546$$

$$H_2 = e^{Y_2} = 11.6 \text{ m}$$

Pour la récurrence de 10 ans $K_{10} = 1.2817$

$$Y_{10} = 2.4514(1 + 0.0615 * 1.2817) = 2.645$$

$$H_{10} = e^{Y_{10}} = 14 \text{ m}$$

Pour la récurrence de 20 ans $K_{20} = 1.6458$

$$Y_{20} = 2.4514(1 + 0.0615 * 1.6458) = 2.696$$

$$H_{20} = e^{Y_{20}} = 14.8 \text{ m}$$

Pour la récurrence de 100 ans $K_{100} = 2.3267$

$$Y_{100} = 2.4514(1 + 0.0615 * 2.3267) = 2.799$$

$$H_{100} = e^{Y_{100}} = 16.4 \text{ m}$$